



ВЕСТНИК МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА ЛЕСА

# ЛЕСНОЙ ВЕСТНИК

Научно-информационный журнал

**2012 г. № 7(90)**

**Координационный  
совет журнала**

**Главный редактор**  
А.Н. ОБЛИВИН

**Зам. главного редактора**  
В.Д. НИКИШОВ

**Члены совета**  
В.В. АМАЛИЦКИЙ  
М.А. БЫКОВСКИЙ  
В.И. ЗАПРУДНОВ  
Н.И. КОЖУХОВ  
А.В. КОРОЛЬКОВ  
В.А. ЛИПАТКИН  
Е.И. МАЙОРОВА  
М.Д. МЕРЗЛЕНКО  
А.К. РЕДЬКИН  
А.А. САВИЦКИЙ  
Ю.П. СЕМЕНОВ  
Д.В. ТУЛУЗАКОВ  
В.А. ФРОЛОВА  
В.С. ШАЛАЕВ

**Ответственный секретарь**  
Е.А. РАСЕВА

**Редактор**  
В.Б. ИВЛИЕВА  
**Набор и верстка**  
М.А. ЗВЕРЕВ  
**Электронная версия**  
Н.К. ЗВЕРЕВА

Журнал издается при поддержке  
Научно-образовательной  
ассоциации лесного комплекса

Журнал зарегистрирован Министерством  
РФ по делам печати, телерадиовещания и средств  
массовых коммуникаций

Свидетельство о регистрации  
ПИ № 77-12923 от 17.06.2002

Журнал входит в перечень утвержденных  
ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей  
ученых степеней

Материалы настоящего журнала могут быть  
перепечатаны и воспроизведены полностью или  
частично с письменного разрешения издательства.

Редакция журнала принимает к рассмотрению не публиковавшиеся ранее статьи объемом 5–10 страниц, включая рисунки и таблицы. Требования к представлению материалов приведены в конце номера.

Рукописи, не соответствующие указанным требованиям, не принимаются; статьи, отклоненные редакцией, не возвращаются.

© ГОУ ВПО МГУЛ, 2012

Подписано в печать 11.09.2012.  
Тираж 500 экз.  
Заказ №  
Объем 25 п. л.

Издательство Московского государственного университета леса  
141005, Мытищи-5, Московская обл.,  
1-я Институтская, 1, МГУЛ. (498)687-41-33  
les-vest@mgul.ac.ru

## СОДЕРЖАНИЕ

Павленко А.Н., Жуков В.Е.	<i>Особенности динамики распространения самоподдерживающихся фронтов испарения в наножидкости в условиях нестационарного тепловыделения</i> .....	5
Фиговский О.Л.	<i>Что еще ждать от нанотехнологий?</i> .....	13
Обливин А.Н., Лопатников М.В.	<i>Длительная прочность композиционных материалов</i> .....	19
<b>Биологические аспекты применения наноматериалов и нанотехнологий в лесном хозяйстве</b>		
Адамов М.Г., Адамова Р.М., Багандов Ш.Б., Гамзатова Х.М.	<i>Лесные пожары и актуальные проблемы лесовосстановления на гарях</i> .....	25
Аксенов П.А., Коровин В.В.,	<i>Строение топляковой древесины дуба</i> .....	29
Воропаева Н.Л., Ибраллиу А.З., Фиговский О.Л., Кадиси Н., Варламов В.П., Карпачев В.В.	<i>Регулирование роста, развития и продуктивности растений олигохитазаном в составе полифункциональных наночипов с применением нанотехнологий</i> .....	32
Федотов Г.Н., Рудометкина Т.Ф., Шалаев В.С.	<i>Влияние поверхностно-активных веществ на свойства почв</i> .....	36
Федотов Г.Н., Шалаев В.С., Поздняков А.И., Пузанова А.Е.	<i>Образование диссипативных структур при взаимодействии воздушно-сухих почв с водой</i> .....	45
Федотов Г.Н., Шалаев В.С.	<i>Минеральные наночастицы в гумусовой матрице почвенных гелей</i> .....	50
Коротков В.Н., Романовская А.А., Карабань Р.Т., Смирнов Н.С.	<i>Оценка углеродного бюджета лесов России в рамках отчетности по Киотскому протоколу</i> .....	58
Родин А.Р., Калашникова Е.А.	<i>Теоретические и практические аспекты применения нанотехнологий при подготовке семян к посеву</i> .....	65
Романовский М.Г.	<i>Углерод древних почв – источник эмиссии С в атмосферу</i> .....	67
Романовский М.Г.	<i>Политенная модель работы камбия</i> .....	72
Романовский М.Г., Мамаев В.В.	<i>Динамика активности поглощающих корней дуба</i> .....	78
Хромова Л.В., Романовский М.Г.	<i>К вопросу о названиях клеток мужского гаметофита сосны</i> .....	83
Чернышенко О.В., Загреева А.Б.	<i>Создание природных популяций редких и исчезающих видов с помощью клонального микроразмножения</i> .....	85
Чернышенко О.В., Румянцев Д.Е.	<i>Дендрохронологический метод отбора деревьев для дальнейшего микроклонального размножения их с учетом продуктивности и устойчивости видов</i> .....	88
Шишкина О.К., Завистяева М.А., Рабцун А.С.	<i>Некоторые результаты практического применения анализа ДНК для генетической идентификации клонов на ЛСП сосны обыкновенной</i> .....	92
<b>Нанотехнологии композитов с использованием древесины</b>		
Азаров В.И., Винославский В.А., Зарубина А.Н., Кондратьев А.В.	<i>Формирование нанокристаллических структур в декоративно-защитных покрытиях</i> .....	95
Азаров В.И., Кононов Г.Н., Горячев Н.Л., Фаньковская А.А.	<i>Модифицирование микологически разрушенной древесины нанодисперсиями элементоорганических соединений</i> .....	97

Бельчинская Л.И., Вариводин В.А. Анисимов М.В.	<i>Получение экологически безопасной фанеры с использованием термоактивированных наносорбентов</i> .....	102
Богданова А.В., Кузнецова Т.Г., Иванкин А.Н.,	<i>Наносенсорный анализ летучих компонентов для дифференциации объектов растительного происхождения</i> .....	107
Прошина О.П., Олиференко Г.Л., Евдокимов Ю.М., Иванкин А.Н.	<i>Наноцеллюлоза и получение бумаги на ее основе</i> .....	112
Пикулев В.Б., Логинова С.В.,	<i>Фотолюминесценция нанокompозита «кремний–целлюлоза»</i> .....	114
Обливин А.Н., Семочкин А.Ю., Семочкин Ю.А., Лопатников М.В.	<i>Модификация карбамидоформальдегидных олигомеров углеродными нанотрубками</i> .....	121
Уголев Б.Н., Галкин В.П., Горбачева Г.А., Калинина А.А., Белковский С.Ю.	<i>Экспериментальные исследования влияния наноструктурных изменений древесины на ее деформативность</i> .....	124
Угрюмов С.А., Цветков В.Е.	<i>Наномодифицированные клеевые составы для производства плитных материалов на основе древесных наполнителей и костры льна</i> .....	127
Забелкин С.А., Файзрахманова Г.М., Герке Л.Н., Грачев А.Н., Башкиров В.Н.	<i>Синтез химических продуктов с использованием древесной пиролизной жидкости</i> .....	131
<b>Нанонинженерия в лесном машиностроении и техническом сервисе</b>		
Быков В.В., Голубев М.И.	<i>Эффективность наноматериалов на основе отходов производства растительных масел для защиты лесных машин от коррозии при хранении</i> .....	136
Гайдар С.М.	<i>Перспективы применения нанотехнологических добавок в смазочные материалы машин и оборудования лесного комплекса</i> .....	138
Гайдар С.М., Низамов Р.К., Голубев М.И.	<i>Концепция создания ингибиторов коррозии с использованием нанотехнологических подходов</i> .....	140
Козырев В.В., Козырева Л.В., Чупятов Н.Н.	<i>Полимерные нанокompозиты в технологических процессах восстановления деталей подъемно-транспортных машин</i> .....	143
Сиротов А.В., Шамарин Ю.А., Панферов В.И., Селиванов К.В.	<i>К вопросу применения нанотехнологий и наноматериалов в лесном машиностроении</i> .....	147
<b>Разработка новых типов датчиков и устройств для контроля и управления системами различного назначения</b>		
Завитаев Э.В., Русакон О.В., Юшканов А.А.	<i>Влияние скин-эффекта на распределение плотности тока внутри субмикронной цилиндрической проволоки</i> .....	150
Лесин Д.Н., Лесин Н.И.	<i>Алгоритм оценки технического состояния фар</i> .....	155
Рыппо В.Л.	<i>Модель гомеостата на потоках частиц сыпучей среды</i> .....	157
Саврухин А.П.	<i>О подобии структур элементов макро- и микромира</i> .....	164
Усатов И.И.	<i>Автоматизированная система зондовых измерений в металлической плазме</i> .....	166
Царьгородцев Ю.П., Полужков Н.П., Харченко В.Н., Усатов И.И.	<i>Получение наноструктурных пленок в установках высокоплотной плазмы</i> .....	173
Цыплаков В.В., Фокин С.В.	<i>О конструкции дросселирующе-предохранительного клапана</i> .....	178

**В** целях развития работ по созданию наукоемкой продукции в лесном комплексе на основе нанотехнологий и наноматериалов впервые в интересах лесного сектора экономики РФ на базе Московского государственного университета леса была проведена 15–17 ноября 2011 г. международная научная конференция «Нанотехнологии и наноматериалы в лесном комплексе». На конференции были обсуждены основные направления nanoиндустрии в лесном комплексе, в том числе биологические аспекты применения наноматериалов и нанотехнологий в лесном хозяйстве, нанотехнологии композитов с использованием древесины, nanoинженерии в лесном машиностроении и техническом сервисе, разработке новых типов датчиков и устройств для контроля и управления системами различного назначения.

В работе конференции приняли участие более 180 ученых и специалистов, в том числе 5 – из концерна «Наноиндустрия», 3 – из ФГУП «ГНЦ ЛПК», 15 – из восьми научно-исследовательских институтов, более 100 ученых различных вузов России и дальнего зарубежья. Среди участников конференции 2 действительных члена РАН, 11 действительных членов и членов-корреспондентов Российской академии естественных наук, 7 зарубежных ученых.

В ходе работы конференции ее участники посетили институт физики твердого тела РАН в Черноголовке, где ознакомились с новейшим оборудованием и методиками, используемыми в исследовании наноструктур различных материалов.

Было заслушано 70 докладов по использованию нанотехнологий и наноматериалов в сфере лесного хозяйства, деревообработке, лесном машиностроении и техническом сервисе, разработке устройств контроля и управления различными системами. Участники конференции отметили инновационный характер развития нанотехнологий в мировой научной и производственной сфере и перспективы применения нанотехнологий в лесном комплексе.

По решению организационного Совета конференции наиболее значимые доклады предлагаются вниманию читателей «Лесного вестника».

---

## ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ САМОПОДДЕРЖИВАЮЩИХСЯ ФРОНТОВ ИСПАРЕНИЯ В НАНОЖИДКОСТИ В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛОТЫДЕЛЕНИЯ

А.Н. ПАВЛЕНКО, ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе ИТ СО РАН,  
В.Е. ЖУКОВ, ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе ИТ СО РАН

*aleks@itp.nsc.ru*

Изучение переходных процессов при кипении в условиях резко изменяющейся во времени тепловой нагрузки является предметом интенсивных исследований в последнее время. С одной стороны, это связано с разработкой микроустройств различного назначения, технологий обработки материалов и создания модифицированных поверхностей с заданными свойствами при интенсивных нестационарных тепловых воздействиях [10, 11]. Для других приложений актуальность данных исследований определяется необходимостью обеспечения устойчивой и безопасной работы теплообменных систем различного функционального назначения при наличии интенсивных пульсаций теплового потока, например, при расчетах тепловой стабилизации устройств с использованием сверхпроводящих материалов, электронного оборудования и т.д. [12]. Предельные значения удельных тепловых потоков, воспринимаемых охлаждающими жидкостями от тепловыделяющих поверхностей, ограничены кризисом теплоотдачи. Поэтому исследованиям критических тепловых нагрузок, а также механизмов развития критических явлений в стационарных и нестационарных условиях работы разнообразных теплопередающих устройств уделяется большое внимание. В области низких приведенных давлений развитие самоподдерживающихся фронтов испарения вдоль тепловыделяющей поверхности при нестационарном тепловыделении является важнейшим фактором перехода к пленочному режиму кипения при существенно более низких тепловых потоках, чем критические тепловые потоки при стационарном тепловыделении. Чрезвычайная сложность взаимосвязанных процессов теплообмена и гидродинамики жидкости у межфазной гра-

ницы, а также учет возникающей гидродинамической неустойчивости фронта, структурообразования, неравновесности испарения и термокапиллярных эффектов затрудняют их строгое математическое описание. В работах [1–4, 13] представлены различные подходы к модельному описанию самоподдерживающегося фронта испарения.

Практическая значимость таких исследований также обусловлена необходимостью создания надежных систем защиты при аварийной разгерметизации устройств, содержащих жидкости при высоких давлениях и температурах (например, атомные и химические реакторы, емкости со сжиженным газом). Переход в равновесное двухфазное состояние также носит в этих случаях взрывной характер и получило название «*flashing*».

Новой мотивацией развития данных исследований является наблюдаемое в ряде экспериментальных работ существенное влияние нанодобавок в жидкости на критические тепловые потоки и граничные температуры смены режимов кипения [11]. Коллоидные системы и наножидкости, в том числе, в последние годы являются предметом интенсивных исследований в связи с перспективами их использования в качестве высокоэффективных теплоносителей в двухфазных теплообменниках различного назначения с фазовыми превращениями, оптимизацией процессов теплообмена в контактных теплообменных аппаратах, в технологиях нанесения различных функциональных покрытий на различные технологические поверхности при интенсивном испарении раствора, при разработке новых типов криогенных двигателей и т.д.

Результаты по нестационарному кипению, динамике парообразования на тепло-

выделяющей поверхности в наножидкостях важны для оптимизации процессов в технологиях обработки древесины, в упрочняющих нанотехнологиях в лесном и сельскохозяйственном машиностроении. Растворы фторсодержащих функциональных тепломеров, например, являются перспективным материалом в деревообрабатывающей промышленности при создании защитных термостойких гидрофобных нанопокровов на дереве, бумаге, тканях. Большую перспективу для восстановления и упрочнения деталей машин, в том числе лесных и сельскохозяйственных, создания технологий и средств защиты элементов оборудования от коррозии и износа представляют процессы нанесения композиционных покрытий с применением нанопорошков при их осаждении из испаряющегося коллоидного раствора.

Закономерности теплообмена, развития кризисных явлений при кипении и испарении в наножидкостях исследованы недостаточно. При этом, как показывает анализ литературных источников, данные по степени интенсификации теплообмена и повышения критического теплового потока при стационарном тепловыделении весьма противоречивы и неоднозначным образом зависят от типа жидкости, приведенного давления, шероховатости теплоотдающей поверхности, параметров, концентрации наночастиц и других факторов. Исследования теплообмена, переходных процессов при кипении и испарении наножидкостей в условиях нестационарной тепловой нагрузки до настоящего времени не проводились. В то же время, как показывает анализ проблемы, проведенный авторами проекта, именно в нестационарных условиях в режиме кипения наножидкостей следует ожидать максимальные эффекты по влиянию нанодобавок на эффективность теплообмена, нестационарный критический тепловой поток и на динамические характеристики смены режимов кипения.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований динамики распространения самоподдерживающегося фронта испарения в условиях свободной конвекции при ступенчатом теп-

ловыделении. Исследования проведены как в чистой жидкости фреон-21, так и при наличии добавок наноразмерных частиц  $\text{SiO}_2$ .

### **Методика экспериментального исследования**

Для проведения экспериментальных исследований теплообмена и динамики переходных процессов при нестационарном тепловыделении в условиях свободной конвекции создан стенд, подробное описание которого приведено в [5].

Рабочая камера представляет собой герметичный цилиндрический сосуд из нержавеющей стали. Внутренний диаметр камеры – 250 мм, высота рабочего пространства – 250 мм. Рабочая камера оснащена окнами для визуальных наблюдений и видеосъемки. Рабочим участком была трубка из нержавеющей стали длиной 116 мм и внешним диаметром 2 мм. Внутренний диаметр – 1,45 мм. Шероховатость поверхности представлена двумя характерными элементами: риски с радиусом кривизны 5 мкм и каверны с радиусом кривизны 20–40 мкм. Нестационарное тепловыделение на рабочем участке создавалось управляемым источником постоянного тока, который обеспечивал длительность переднего фронта токового сигнала не более 3 мс.

Управление источником тока и измерение сигналов датчиков осуществлялось через персональный компьютер посредством платы 16-разрядного 16-канального АЦП с частотой 1 МГц и платы ЦАП. Температура рабочего участка в квазистационарных режимах измерялась тремя платиновыми термометрами сопротивления NEL-700 номинального сопротивления 1000 Ом. С использованием такого же термометра измерялась температура в объеме жидкости. Постоянная времени термометров, установленных в рабочем участке, составила 1 с. Средняя по длине температура рабочего участка в переходных процессах измерялась по температурной зависимости сопротивления участка. Для этого в средней части рабочего участка на отрезке 40 мм измерялось падение напряжения. В каждом измерении проводилась калибровка по температуре невозмущенной жидкости либо по

температуре рабочего участка в квазистационарном состоянии. Такая методика позволила измерять среднюю температуру рабочего участка с ошибкой не более  $\pm 3$  К. Визуальные наблюдения динамики образования и распространения паровой фазы на теплоотдающей поверхности фиксировались высокоскоростной цифровой видеокамерой Phantom v 7.0. Съемка в зависимости от диапазона изменения скорости распространения фронтов производилась при скоростях 1000, 2000, 3000, 15000 кадров/с с соответствующими экспозициями 499, 268, 185, 44 мкс. Для измерения скорости распространения парового фронта использовалось прилагаемое к камере программное обеспечение. Погрешность измерения средней скорости на участке вдоль нагревателя 6–12 мм не превышала 0,05 м/с, мгновенной скорости на масштабе 5 кадров – в пределах 10 %.

При ступенчатом тепловыделении проведено сравнение динамики изменения измеренной температуры стенки с расчетом для режима нестационарной теплопроводности. Сравнение измеренного в переходном процессе температурного напора на временах меньших, чем время развития конвекции, показало хорошее соответствие эксперимента и численного расчета.

Эксперименты проводились на фреоне-21 ( $\text{CHCl}_2\text{F}$ ) и на фреоне-21 с добавками наноразмерных частиц  $\text{SiO}_2$  при приведенных давлениях  $P/P_{\text{сг}} = 0,037$  (0,193 МПа). Жидкость в данных опытах находилась на линии равновесия с паром. Опыты проводились при горизонтальной ориентации тепловыделяющего элемента. В опытах с добавкой наноразмерных частиц использовались частицы, полученные в ИТПМ СО РАН испарением на ускорителе электронов [6]. Размер частиц 20–25 нм. Частицы обладают гидрофильными свойствами. Наножидкость приготавливалась непосредственно в экспериментальном объеме с предварительным ее вакууммированием перед вводом жидкости. Количество порошка, требуемое для обеспечения концентрации 0,03 объемных %, помещалось в объем, который откачивался до давления  $10^{-2}$  мм рт. ст. Затем объем заполнялся жидким фреоном-21

и перемешивался многократным переворотом экспериментального объема. Первая серия измерений при ступенчатом тепловыделении была проведена через час после приготовления жидкости. Через сутки была выполнена повторная серия опытов.

Для сравнения с результатами опытов на чистой жидкости (фреон-21 без нанодобавок) через сутки после приготовления наножидкости проведены квазистационарные измерения в режиме однофазного теплообмена. Результаты приведены на рис. 1, где линия 1 соответствует известному соотношению  $\text{Nu} = 0,54\text{Ra}^{0,25}$ , которое описывает теплообмен при ламинарной конвекции. Точки соответствуют измерениям в чистом фреоне-21 (точки 2) и во фреоне-21+ $\text{SiO}_2$  (точки 3).

На рис. 1 измерения в чистой жидкости хорошо согласуются с соотношением для ламинарной конвекции, в то время как измерения в наножидкости показали несколько более низкие значения числа Nu. В то же время в наножидкости при ступенчатом тепловыделении режим однофазной конвекции наблюдался до перегрева стенки 62 К, тогда как на жидкости без добавок – не более 24 К. Если предположить, что внесение наночастиц привело к уменьшению эффективной теплопроводности жидкости на 11 %, то измерения ложатся на зависимость для ламинарной конвекции (точки 4).

### Динамика распространения фронта испарения в жидкости

При ступенчатом тепловыделении проводились измерения времени начала роста парового образования и скорости распро-

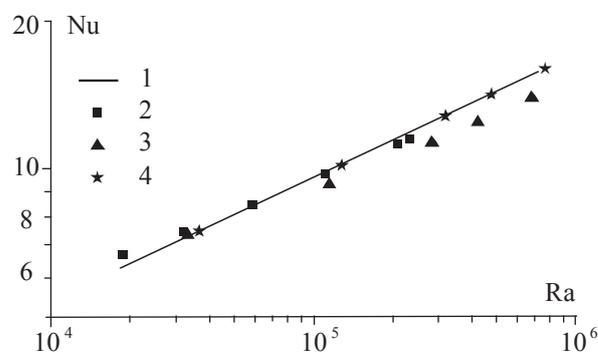


Рис. 1. Квазистационарные измерения теплоотдачи в режиме однофазной свободной конвекции

странения вдоль нагревателя возникающих паровых фронтов с использованием скоростной видеосъемки. Временная зависимость мгновенной температуры стенки до момента вскипания жидкости определялась по вольт-амперной характеристике рабочего участка. С момента образования паровой фазы на измеряемом отрезке рабочего участка температура стенки определялась из расчета по уравнению нестационарной теплопроводности. Такой подход справедлив при достаточно больших скоростях разогрева рабочего участка, когда конвективный механизм отвода тепла от стенки не успевает развиваться.

На рис. 2 приведены видеок кадры движения парового фронта в разные моменты времени и, соответственно, при разных зна-

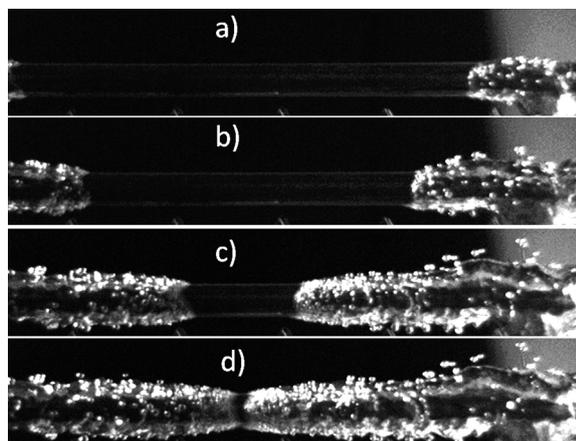


Рис. 2. Распространение парового фронта в чистой жидкости при ступенчатом тепловыделении. **a** –  $\Delta T = 57$  К,  $\tau = 35.3$  мс; **b** –  $\Delta T = 64$  К,  $\tau = 39.0$  мс; **c** –  $\Delta T = 71$  К,  $\tau = 42.6$  мс; **d** –  $\Delta T = 73$  К,  $\tau = 43.6$  мс

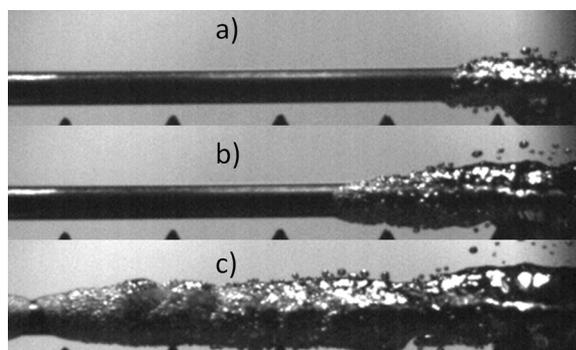


Рис. 3. Распространение парового фронта в жидкости с наноразмерными добавками  $\text{SiO}_2$  при ступенчатом тепловыделении. **a** –  $\Delta T = 57$  К,  $\tau = 34.3$  мс; **b** –  $\Delta T = 64$  К,  $\tau = 38.3$  мс; **c** –  $\Delta T = 70.4$  К,  $\tau = 42$  мс

чениях перегрева горизонтальной теплоотдающей поверхности при давлении  $P = 0.193$  МПа. Как видно на фотографиях, при перегревах 57 К и 64 К паровой фронт достаточно гладкий, с небольшим количеством мелких пузырей в зоне межфазной поверхности. При перегревах выше (65–67) К (рис. 3 **c**, **d**) наблюдается сильное возмущение межфазной поверхности с образованием множества мелких пузырей. Аналогичное состояние межфазной поверхности описано в работе [7], а также наблюдалось в работе [8].

На рис. 3 приведены фотографии движения парового фронта во фреоне-21 с наноразмерными частицами. Из сравнения с фотографиями при аналогичных перегревах стенки для чистого фреона-21 (рис. 2) видно, что при перегревах 57 К характер межфазной поверхности примерно одинаков. При перегреве 64 К в окрестности лобовой точки фронта наблюдаются возмущения межфазной поверхности, аналогичные возмущениям при перегреве 71 К в чистой жидкости. При перегреве 70,4 К межфазная граница в жидкости с наночастицами очень сильно возмущена.

На рис. 4 показано сравнение мгновенной скорости распространения самоподдерживающегося фронта испарения в чистой жидкости и в жидкости с наночастицами. На рис. 4 приведена зависимость мгновенной скорости распространения фронта от температурного напора  $\Delta T_s$  между температурой теплоотдающей поверхности и температурой насыщения  $T_s$  для серии опытов при фиксированном тепловыделении на горизонтальном нагревателе ( $q = 179,0 \times 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>) и давлении 0,193 МПа. Линия 1 соответствует расчету по соотношению (1) из [2]

$$U_{fr} = \frac{4 (T_w - \tilde{T}_s)^2 \lambda' c' \rho'}{\pi \delta_{therm} \tilde{r}^2 (\tilde{\rho}'')^2}. \quad (1)$$

На рис. 4 осредненные по нескольким реализациям зависимости скорости фронта от перегрева стенки относительно температуры насыщения соответствуют: линия 2 – чистая жидкость; линия 3 – 0,03 об. %  $\text{SiO}_2$  для опытов через час после приготовления жидкости; линия 4 – 0,03 об. %  $\text{SiO}_2$  для опытов через сутки после приготовления жидкости. Точки соответствуют мгновенным значениям скоро-

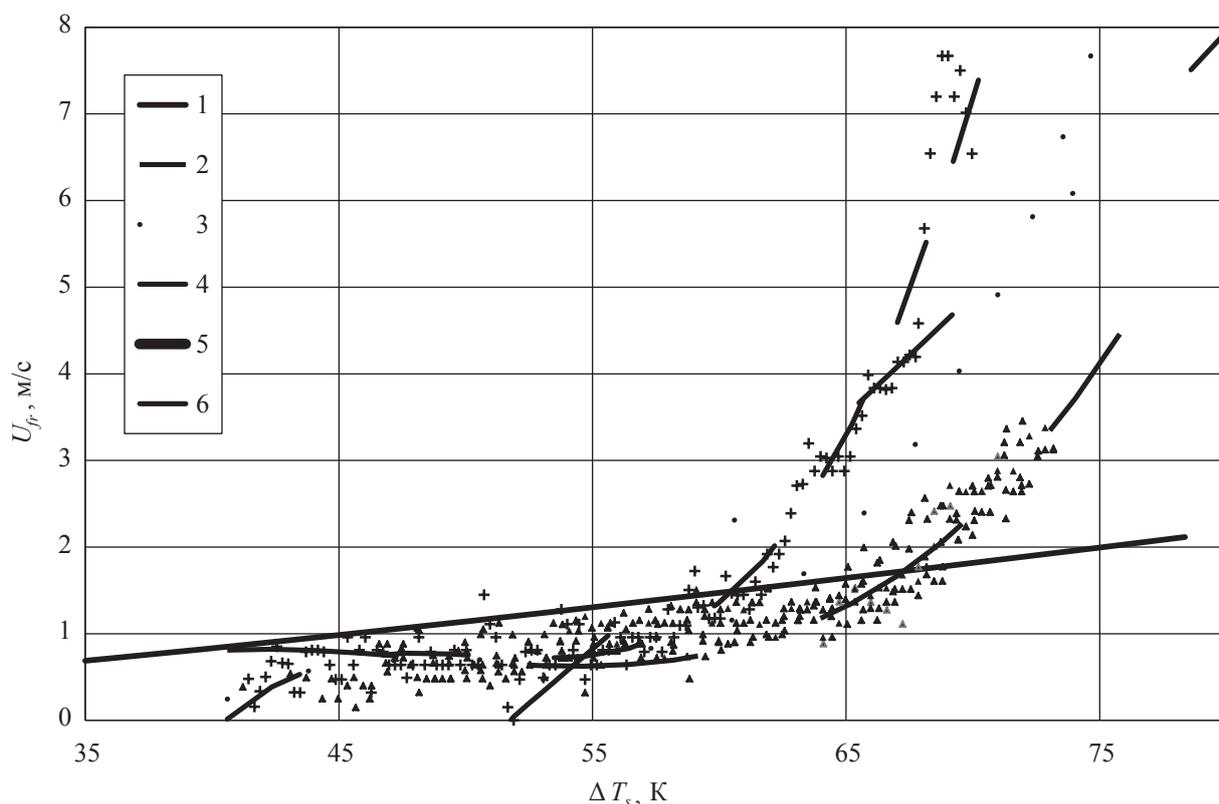


Рис. 4. Зависимость мгновенной скорости распространения парового фронта от температурного напора при ступенчатом тепловыделении

сти в нескольких реализациях как для чистой жидкости, так и для наножидкости для опытов через сутки после приготовления. Линия 5 соответствует расчетному значению скорости, когда возникает неустойчивость на межфазной поверхности фронта при достижении предельной межфазной плотности теплового потока, определяемой с использованием соотношения (2) в соответствии с [9]

$$q_{L.inst} = \sqrt{2\tilde{r}} \left( \frac{\tilde{\sigma}g}{\rho' - \tilde{\rho}''} \right)^{\frac{1}{4}} (\rho' \tilde{\rho}'')^{\frac{1}{2}}. \quad (2)$$

Линия 6 на рис. 4 соответствует расчету по модели [1]. Скорость фронта возрастает с разогревом теплоотдающей поверхности как в случае измерений в чистой жидкости, так и в случае с добавкой наноразмерных частиц. Наблюдаются две области с различным темпом изменения скорости парового фронта в зависимости от изменения величины температурного напора. Разграничиваются эти области величиной перегрева стенки  $\Delta T^* \sim (65-67)$  К для чистой жидкости и  $\Delta T^* \sim (59-61)$  К для наножидкости. В первой области ( $\Delta T_w < \Delta T^*$ ) изменение скорости от температурного

напора удовлетворительно описывается соотношением (1) по модели, в основании которой лежит предположение о конвективном механизме передачи тепла к невозмущенной межфазной границе фронта с его поперечным масштабом, равным толщине нарастающего теплового слоя  $\delta_{therm}$  [2].

Во второй области наблюдается более значительная интенсивность испарения, что свидетельствует о включении дополнительных механизмов интенсификации передачи тепла на линейных масштабах меньшего размера. В работе [2] отмечалось наличие порога, при котором изменяется характер зависимости скорости распространения парового фронта от температурного перегрева. Это связывается авторами с потерей устойчивости межфазной поверхности по отношению к гидродинамическим возмущениям в условиях интенсивных массовых потоков на межфазной границе при  $q_{int} > q_{L.inst}$ , где соответствующая устойчивому режиму испарения предельная величина теплового потока через межфазную поверхность  $q_{L.inst}$  вычисляется с использованием соотношения (2) по [9].

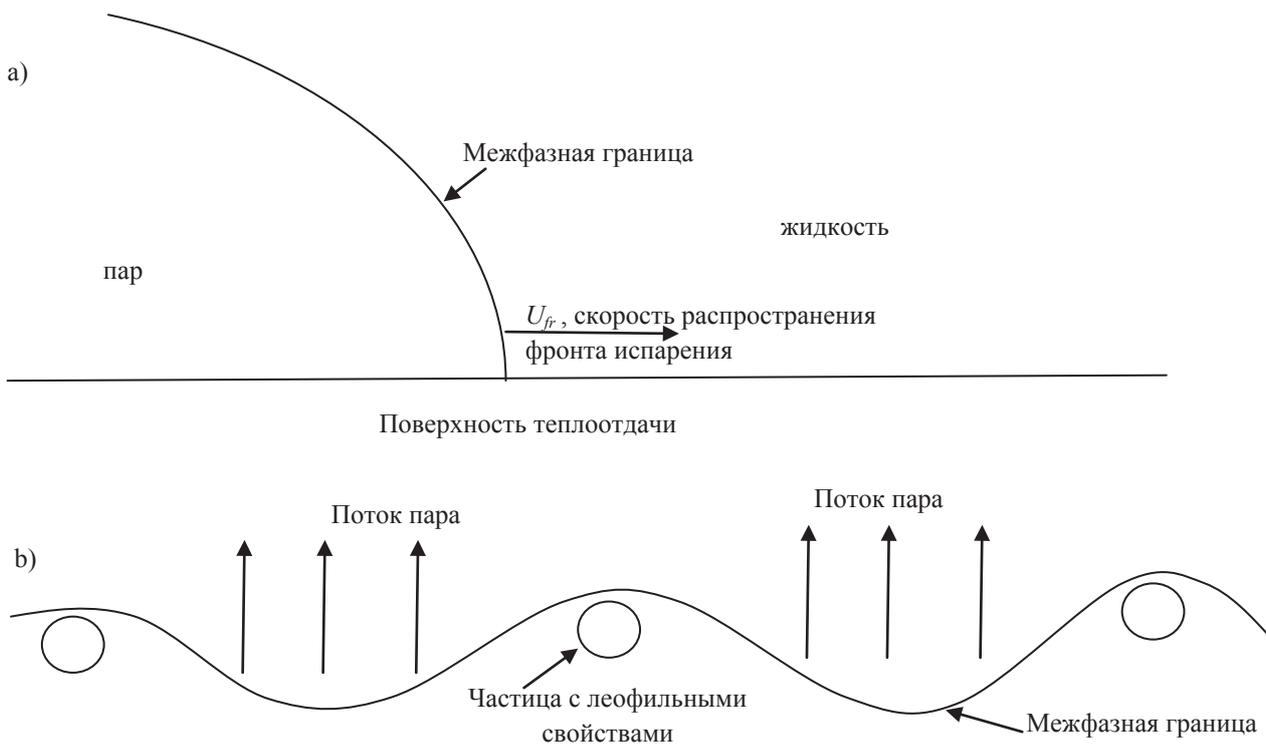


Рис. 5. Схематичное представление искривления интенсивно испаряющейся межфазной границы наноразмерными частицами с леофильными свойствами: а – схема распространения фронта испарения; б – искривление интенсивно испаряющейся межфазной границы наноразмерными частицами с леофильными свойствами

Авторами работы [2] при обобщении опытных данных по скорости распространения самоподдерживающегося фронта испарения, полученных при вскипании различных жидкостей в условиях стационарного тепловыделения при высоких температурных напорах (соответствующих области  $q_{int} > q_{L.inst}$ ), была предложена эмпирическая поправка  $f$  ( $q_{int}/q_{L.inst}$ ) к соотношению (1). Поправка учитывает влияние мелкомасштабных возмущений фронта испарения при превышении величины теплового потока через межфазную границу  $q_{int} \sim 4 q_{L.inst}$ . Для экспериментальных данных, представленных в настоящей работе, величина  $q_{L.inst}$  достигается при скоростях фронта 1,92 м/с при давлении 0,193 МПа (рис. 4, линия 5). Этой скорости соответствует значение  $\Delta T_s = (66-67)$  К для чистой жидкости и  $(61-62)$  К для наножидкости. Как видно из рис. 4, изменение темпа нарастания скорости парового фронта от перегрева теплоотдающей поверхности в условиях нестационарного тепловыделения начинается практически при достижении порога  $q_{int} = q_{L.inst}$ . Очевидно, что функциональная зависимость от плотнос-

ти теплового потока и линейных масштабов процесса, учитывающая интенсификацию теплообмена в жидкости вблизи мелкомасштабных возмущений, будет различной для условий нестационарного и квазистационарного законов тепловыделения в связи со значительными отличиями в величине температурного градиента в тепловом слое и в соотношении масштабов возмущений и нарастающего теплового слоя у тепловыделяющей поверхности.

Как видно из графика, при перегревах стенки менее 60 К значения скорости фронта при одних и тех же температурных напорах практически одинаковы для чистой жидкости и жидкости с наночастицами. При перегревах более 60 К в наножидкости темп роста скорости становится значительно более высоким, в то время как в чистой жидкости он сохраняется до перегрева  $(65-67)$  К. Одновременно с существенным ростом скорости самоподдерживающегося фронта испарения в наножидкости наблюдается интенсивное формирование мелкомасштабных возмущений на межфазной поверхности (рис. 3).

Значительное увеличение скорости самоподдерживающегося фронта испарения при добавлении наноразмерных частиц в жидкость можно объяснить влиянием трех факторов: изменением теплофизических свойств жидкости; осаждением частиц на поверхность теплоотдачи с образованием тонкого пористого покрытия; взаимодействием частиц с жидкостью на межфазной границе при интенсивном испарении и, как следствие, более ранним развитием неустойчивости межфазной границы во фронте. Незначительное изменение зависимости интенсивности теплоотдачи  $Nu(Ra)$  в режиме теплообмена при свободной конвекции указывает на малое изменение таких свойств, как вязкость и теплопроводность при наличии нанодобавок и соответственно на их незначительное влияние на скорость распространения фронта. Осаждение частиц на теплоотдающей поверхности является фактором более вероятным. В пользу этой гипотезы свидетельствует факт увеличения скорости фронта со временем проведения опытов от момента приготовления жидкости с нанодобавками. Но против этой версии тот факт, что в начальные моменты движения фронта не наблюдается существенной разницы для скорости в опытах с чистой жидкостью и жидкостью при наличии нанодобавок. Гипотеза о влиянии наночастиц на параметры устойчивости межфазной границы, на более раннее и быстрое развитие мелкомасштабных возмущений представляется наиболее привлекательной. Для ее детального рассмотрения необходимо создание на первом этапе упрощенной модели, которая позволила бы определить критерии устойчивости межфазной границы в присутствии наноразмерных частиц. Гидрофильные свойства частиц вполне могут проявляться в наножидкости (фреон-21+  $SiO_2$ ), поскольку дипольный момент фреона-21 равен 1,29 Д, что соизмеримо с дипольным моментом воды, равным 1,86 Д. В условиях интенсивного испарения жидкости леофильность наночастиц будет приводить к искривлению межфазной границы, как это показано на рис. 5. Следствием этого будет более раннее и быстрое развитие мелкомасштабных возмущений на межфазной поверх-

ности фронта, и соответственно более крутая зависимость скорости фронта от температурного напора. При формировании и развитии мелкомасштабных возмущений их длина волны будет зависеть от объемной концентрации наноразмерных частиц в жидкости и, очевидно, будет значительно меньше длины капиллярно-гравитационных волн. Влияние неустойчивости Ландау на межфазной поверхности при интенсивном испарении на динамику развития фронта следует рассматривать в данных условиях с учетом леофильных свойств наноразмерных частиц.

Таким образом, показано, что состояние межфазной границы оказывает существенное влияние на скорость распространения самоподдерживающегося парового фронта. Потеря устойчивости межфазной границы приводит к возникновению мелкомасштабных возмущений, повышению локального теплообмена через границу и, как следствие, повышению средней скорости распространения фронта. В экспериментальных исследованиях динамики переходных процессов и кризисных явлений при кипении наножидкостей при нестационарном тепловыделении впервые обнаружено, что добавление во фреон R 21 наноразмерных частиц  $SiO_2$  (средний размер наночастиц 20–25 нм, модификация с гидрофильными свойствами) привело к более чем двукратному увеличению скорости распространения самоподдерживающихся фронтов испарения при высоких температурных напорах. Показано, что данный весьма значительный эффект роста скорости фронтов парообразования в наножидкости в области высоких значений числа Якоба связан, по-видимому, с более ранним и быстрым развитием мелкомасштабных возмущений на межфазной поверхности фронта вследствие неустойчивости Ландау. Выявлены режимы при менее интенсивном испарении в наножидкости с гладкой невозмущенной межфазной поверхностью самоподдерживающихся фронтов, для которых эффект влияния добавления наночастиц не наблюдается.

Попытка учета влияния мелкомасштабных возмущений, основанная на методике обработки экспериментальных данных, полу-

ченных при квазистационарных условиях [2], не вполне справедлива для условий нестационарного тепловыделения. Необходимы дальнейшие экспериментальные исследования для определения характерных масштабов возмущений межфазной границы и корректного учета их влияния на динамику распространения самоподдерживающегося парового фронта как в условиях чистой жидкости, так и в жидкости с добавками наноразмерных частиц.

Полученные принципиально новые результаты важны для разработки методов описания развития переходных процессов и кризисных явлений при кипении и испарении жидкостей и наножидкостей при различных нестационарных законах тепловыделения, в задачах повторного смачивания сильно перегретых поверхностей, расчета нестационарных теплогидродинамических характеристик при контактном теплообмене. Практическое значение связано с разработкой способов интенсификации теплообмена при кипении и расширением границ оптимальных и безопасных режимов работы различных типов теплообменников с высокой и нестационарной теплонапряженностью. Результаты будут полезны для оптимизации, расчетов современных высокоэффективных малоинерционных испарителей, контактных теплообменников, в криогенной, холодильной технике, пищевой и деревообрабатывающей промышленности, в технологиях нанесения функциональных покрытий на различные поверхности при выпаривании пленок коллоидных растворов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Интеграционного проекта СО РАН совместно с УрО РАН (№ 68).

Статья подготовлена по материалам пленарной лекции член-корр. РАН, д-ра физ.-мат. наук А.Н. Павленко «Современные методы диагностики тепловых и гидродинамических характеристик в теплообменном оборудовании с фазовыми переходами», представленной на международной конференции «Нанотехнологии и Наноматериалы в Лесном Комплексе», Москва, Россия, 15–17 ноября 2011 г.

## Библиографический список

1. Авксентюк, Б.П. Модель фронта испарения / Б.П. Авксентюк, В.В. Овчинников // ТВТ, 1996. – Т. 5. – С. 809–812.
2. Павленко, А.Н. Приближенная расчетная модель самоподдерживающегося фронта испарения / А.Н. Павленко, В.В. Лель // Теплофизика и аэромеханика, 1999. – Т. 6. – № 1. – С. 111–124.
3. Молошников, А.С. Два режима вскипания перегретой жидкости на проволоке / А.С. Молошников, И.И. Шмаль // ТВТ, 2000. – Т. 38. – № 1. – С. 57–60.
4. Павлов, П.А. Динамика формирования паровой пленки при быстром перегреве жидкости / П.А. Павлов, В.Е. Виноградов // Теплофизика высоких температур, 2010. – Т. 48. – № 5. – С. 717–724.
5. Жуков, В.Е. Динамика вскипания и кризисные явления при ступенчатом тепловыделении в условиях свободной конвекции во фреоне-21 / В.Е. Жуков, А.Н. Павленко, А.С. Суртаев и др. // Труды V Российской национальной конференции по теплообмену (РНКТ-5). 25–29 октября 2010, М., 2010. – Т. 4. – С. 84–87.
6. Бардаханов, С.П. Получение нанопорошков испарением исходных веществ на ускорителе электронов при атмосферном давлении / С.П. Бардаханов, А.И. Корчагин, Н.К. Куксанов и др. // Доклады АН, 2006. – Т. 409. – № 3. – С. 320–323.
7. Сыромятников, С.Н. Неустойчивость поверхности испарения / С.Н. Сыромятников, П.А. Павлов // Теплофизика высоких температур, 1998. – Т. 36. – № 2. – С. 298–303.
8. Авксентюк, Б.П. Самоподдерживающийся фронт вскипания / Б.П. Авксентюк, В.В. Овчинников, В.Я. Плотников // Изв. СО АН СССР. Сер. тех. наук, 1989. – Вып. 2. – № 2. – С. 17–23.
9. Ландау, Л.Д. Механика сплошных сред / Л.Д. Ландау, Е.П. Лифшиц. – М.: Гостехиздат, 1944. – 788 с.
10. Okuyama K., Takehara R., Iida Y., and Kim J. Pumping action by boiling propagation in a microchannel // *Microscale Thermophys. Eng.*, 2005, vol. 9, no. 2. P. 119–135.
11. Huai X., Wang G., Jin R., Yin T., and Zou Y. Microscopic explosive boiling induced by a pulsed-laser irradiation // *Heat Mass Transfer*, 2008, vol. 45. P. 117–126.
12. Al'tov V. A., Zenkevich V. B., Kremlev M. G. and Sychev V. V. Stabilization of superconducting magnetic systems; edited by Sychev V. V. 3-th elaborated and supplement edition. Moscow: Izdatelskiy Dom MEI, 2008, 461 p.
13. Avksentyuk B. P. Non-equilibrium model of an evaporation front // *Russian Journal of Engineering Thermophysics*, 1995, vol. 5. P. 1–8.
14. Aktershev S. P., Ovchinnikov V. V. Model of stationary motion of multiphase surface in the layer of extremely heated liquid, // *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 2008, vol. 49, no.2. P. 47–55.
15. Kim S. J., Bang I. C., Buongiorno J., Hu L. W. Surface Wettability Change During Pool Boiling of Nanofluids and Its Effect on Critical Heat Flux // *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, vol.50. P. 4105–4116.

---

## ЧТО ЕЩЕ ЖДАТЬ ОТ НАНОТЕХНОЛОГИЙ?

О.Л. ФИГОВСКИЙ, *Интернациональный нанотехнологический исследовательский центр  
Полимейт, Израиль, Нанотех индастрис инк., США*

*figovsky@netvision.net.il*

Как правило, когда говорят о нанотехнологиях, основное внимание уделяют их освоению в новой электронике, медицинских приборах и диагностике, в новых источниках тока. Но нанотехнологии привносят прогресс и в такие «консервативные» области, как, например, сельское хозяйство.

Так, ученые из Малайзии показали возможность обнаружения пестицидов в продуктах питания с помощью квантовых точек (КТ) ZnCdSe. Учеными N.A. Bakar, M.M. Salleh и др. было изучено изменение спектра фотолюминесценции квантовых точек при погружении их в водный раствор и раствор с пестицидами. Для этого сравнили интенсивность спектров люминесценции КТ, погруженных в деионизированную воду и в раствор с пестицидами. Оказалось, что ширина спектра, его форма и пик от вида пестицида значительно не зависят. Эти параметры определяются размером КТ и их формой. При погружении КТ в раствор с пестицидами происходит лишь небольшое «тушение» интенсивности. «Тушение» спектра объясняется по-разному. Например, форстеровским резонансным переносом энергии (передачей энергии возбуждения между молекулами-хромофорами в ближнем поле за счет диполь-дипольного взаимодействия), или транспортом электронов при контакте молекул пестицида-акцепторов с поверхностью КТ-доноров (соответственно уменьшением вклада электронов КТ в люминесценцию). С увеличением концентрации пестицидов от 2,5 до 2500 мг/л интенсивность спектра фотолюминесценции КТ уменьшается линейно. Степень чувствительности КТ к различным пестицидам определяется по экспериментально полученным кривым. Ученые считают, что квантовые точки ZnCdSe можно использовать для определения наличия пестицидов в жидкостях.

Для повышения адаптивности культурных растений к внешним негативным

факторам при хранении, получения полноценных и здоровых всходов, роста и развития растений, повышения их продуктивности и качества семян последующих репродукций компанией NanotechInd., Inc. (США) разработана новая агробионанотехнология, отличающаяся лабильностью и мобильностью состава и свойств, которые могут согласно прогнозам меняться, обеспечивая при этом устойчивое развитие производства посевных семян и растениеводства, а также сельскохозяйственного производства в целом.

В этой запатентованной нанотехнологии применен подход, позволяющий использовать природные системы адаптации семени и биологически активные наночипы в порах кожуры и тем самым создавать дополнительную устойчивость и надежность семени к негативным факторам окружения. Биологически активные наночипы содержат все необходимые ингредиенты для прорастания семян и их защиты от воздействия неблагоприятных факторов окружения.

Разработанная наноагробиотехнология позволяет менять состав физиологически активных веществ, в том числе фитосанитарных, и их природу с учетом особенностей формирования наносистем и взаимодействия компонентов (наночастиц) на молекулярном и надмолекулярном уровнях друг с другом в наночипах в зависимости от видов выращиваемых культур, конкретных почвенно-климатических условий возделывания различных растений, специфичности заболеваний, вызванных микроорганизмами почвенных и других вредителей, а также достичь длительности хранения посевного материала без потери его посевных качеств.

В едином технологическом процессе объединена нанотехнология предпосевной подготовки семян, состоящая из процессов создания, стабилизации и нанесения физиологически активных полифункциональных

наночипов, включающих по крайней мере один природный минерал, стабилизатор наночипа, регулятор роста и развития растений, ингибитор возбудителей заболеваний растений, микроэлемент питания, удобрение, иммуномодулятор и другие физиологически активные, а также фитосанитарные вещества.

Принципиально новым в этой нанотехнологии является разработанный комплексный подход к процессу получения высококачественного посевного материала. Он состоит в том, что биологически активные и фитосанитарные компоненты, предназначенные для повышения адаптации семян и растений к реальным негативным условиям окружающей среды, конструируются в виде полифункциональных наночипов, а их встраивание в нанопоры кожуры семян осуществляется с помощью нанотехнологии.

Важным в разработанной нанотехнологии является то, что, принимая во внимание прогноз негативных для растениеводства факторов, состав и природу наночипов можно менять с учетом проявления новых рисков, заполняя пассивные наноматрицы соответствующими биологически активными и фитосанитарными наночастицами, обеспечивающими повышение толерантности растений к новым неблагоприятным факторам окружающей среды, всхожести, урожайности и продуктивности.

В результате мониторинга эффективности нанотехнологии предпосевной подготовки семян выявлены следующие основные преимущества:

- пролонгация покоя семян – возможность хранения посевного материала без потерь качества длительное время;
- активация процессов выхода семян из состояния покоя в меняющихся условиях окружающей среды за счет дифференцированного использования разнообразных по составу и структуре наночипов в предпосевной обработке семян;
- увеличение всхожести семян;
- повышение толерантности растений к возбудителям заболеваний, засолению, засухе, заморозкам и другим негативным факторам окружения;

- увеличение урожайности;
- улучшение качества продукции за счет сохранения и повышения показателей, характеризующих хозяйственно-ценные признаки растений;
- существенное уменьшение норм расхода физиологически активных и фитосанитарных компонентов;
- высокая экологичность разработанной нанотехнологии;
- адаптивность к имеющимся технологиям предпосевной подготовки семян.

Указанные преимущества достигаются за счет разработки физиологически активных наночипов для обработки семян различных сельскохозяйственных культур. Состав и количество нанесенных на семена наночипов зависят от результатов мониторинга условий возделывания сельскохозяйственных культур, статистических данных экоусловий и прогноза на ближайший год по таким показателям, как температура почвы и окружающей среды, влажности и атак микроорганизмов, возбудителей заболеваний, характера заболеваний, типов семян, обладающих глубоким или неглубоким покоем, а также их размером и потенциальными возможностями семени, выражающимися в показателях энергии прорастания и всхожести. Кроме того, состав наночипов формируется с учетом наличия в почвах доступных форм калия, фосфора и азота, а также различных необходимых для растений микроэлементов питания – цинка, меди, кобальта, железа, лития, марганца, молибдена и других микро- и мезоэлементов питания. Поэтому диапазон составов компонентов наночипов варьируется в очень широких пределах от 1.10–10 % до 100 %. Гомеопатические количества наночипов используются при замочке семян растений, макроколичества – при опудривании, а промежуточные – для дражирования.

Составы наночипов варьируются в зависимости от внешних факторов, воздействующих на семена, а также необходимости достижения высокой полевой всхожести. По этому принципу меняется состав наночипов в зависимости от возделываемой культуры. В нанотехнологии предусмотрена масштабная

---

дифференциация получения наночипов, т.к. предусмотреть все внешние факторы одновременно невозможно, также очень сложно прогнозировать возникновение атак возбудителями заболеваний, а также изменение параметров окружающей среды, которые тесным образом связаны с активацией или затуханием атак, а также продуктивностью растений, особенно при изменении климата, который мы наблюдаем. Проще говоря, нельзя создать один наночип на все случаи жизни и огромное количество наночипов в ответ на все реальные, а главное – и возможные вызовы.

В технологическом аспекте разница в использовании наночипов для обработки семян растений, имеющих различные типы покоя, заключается в том, что семена, имеющие неглубокий покой, обрабатываются без дополнительных процедур, а имеющие глубокий покой – скарификации, т.е. механическому повреждению кожуры, что позволяет обеспечить проникновение в поры кожуры наночипов и тем самым влиять на активацию ростовых процессов и способствовать индуцированию защитных реакций растений на фитопатогены – возбудители заболеваний, а также стрессы, вызванные засолением почв, экотоксикантами, дефицитом молекул, обеспечивающих питание растений на самых ранних этапах развития (макро- мезо- и микро-элементы питания).

Таким образом, в настоящее время предпосевная обработка семян различных сельскохозяйственных культур может проводиться с использованием современных нанотехнологических подходов и применением экологически чистых природных многокомпонентных полифункциональных наночипов, состоящих из пористых матриц и заполненных физиологически активными веществами различного спектра действия. Такие наночипы имеют пористую высокоразвитую поверхность, размер пор которых колеблется от нескольких нанометров до микрон. Как правило, эти матрицы имеют различную природу, физико-химические свойства, эксплуатационные характеристики и другие параметры, определяющие возможности их использования в качестве носителей для получения физио-

логически активных полифункциональных наносистем. Причем при определенных условиях конструирования наночипов достигается пролонгированное выделение действующих веществ, обладающих биологической активностью. Эффект пролонгации обеспечивает длительное воздействие средств защиты растений на вредителей, возбудителей заболеваний сельскохозяйственных растений, сорную растительность в посевах и другие неблагоприятные факторы окружения.

Американские ученые обнаружили в атмосфере Земли значительное количество наночастиц, которое продолжает увеличиваться. По их мнению, наночастицы, отражая солнечные лучи, могут серьезно изменить климат на планете, вызвав очередной ледниковый период. Также наночастицы могут быть опасны для здоровья человека, предупреждают ученые. По последним наблюдениям американских ученых, в атмосфере нашей планеты уже находится значительное количество наночастиц, невидимых глазом, но могущих оказать влияние как на погодные процессы, так и на здоровье человека, причем не обязательно положительным образом.

По мнению Реньи Цанг и Алексея Хализова из отделения атмосферных исследований Техасского университета агрокультуры и машиностроения (Texas A&M University), количество наночастиц в разных частях света увеличивается, но почему это происходит остается загадкой. Ученые занимались вопросом того, как образуются наночастицы и каким образом происходит увеличение их количества, когда они вступают во взаимодействия с различными органическими испарениями. «Это один из самых плохо изученных атмосферных процессов, – говорит Реньи Цанг, – однако нам удалось выяснить, что некоторые виды органики быстро растут в атмосфере. Собираясь в больших количествах, они отражают солнечный свет назад в космос – своего рода обратный парниковый эффект. А ведь это может значительно изменить климат на нашей планете». Кроме того, отмечают ученые, распространение наночастиц в воздухе может обострить такие заболевания, как астма, эмфизема и другие легочные забо-

левания. По словам исследователей, они разработали новый способ замера наночастиц и создали модель определения степени их влияния на атмосферные условия. «Погодные изменения – самое существенное последствие наличия наночастиц» – подчеркивает Реньи Цанг. «Образуясь, наночастицы собираются в облака и могут влиять на погоду. Они могут образовываться в районах, где есть нефтехимические заводы, выбрасывающие много аэрозоля, около других заводов».

Широкое применение электронной бумаги «i2R e-Paper» поможет спасти лесные массивы на Земле, так как такая бумага, разработанная тайваньскими исследователями, является первой, которая может быть стерта и записана по-новому достаточно большое количество раз. Для печати на электронной бумаге «i2R e-Paper» используется специальный принтер с термопечатающей головкой, наподобие тех, которые используются в факсах. Когда напечатанная на листе электронной бумаги информация теряет свою актуальность, она стирается одним нажатием кнопки на принтере. При проведении испытаний электронной бумаги «i2R e-Paper» исследователи из Тайваньского исследовательского института промышленных технологий (Industrial Technology Research Institute) определили, что она может выдержать без потери качества около 260 циклов стирания и последующей печати. Такая электронная бумага, по мнению разработчиков, является идеальной заменой для различного рода объявлений, временных указательных знаков, железнодорожных билетов и прочих документов, которые, как правило, заканчивают свое существование в мусорной корзине. Электронная бумага «i2R e-Paper», несмотря на свое «электронное» наименование, для выполнения своих функций не требует никакого источника электроэнергии и ламп подсветки. Ее «чудесные» свойства заключены в ее покрытии – полимерной пленке со специальными жидкими кристаллами, изготовленными на основе молекул холестерина. Отсутствие любых электрических проводников делает эту бумагу гибкой и чрезвычайно легкой. Опытные образцы электронной бумаги «i2R e-Paper» имеют размер стан-

дартного листа формата А4. На изготовление одного листа была затрачена сумма, эквивалентная двум долларам США. Но внедрение технологии массового производства такой бумаги позволит сократить в несколько раз ее стоимость, а появления на потребительском рынке бумаги «i2R e-Paper» следует ожидать в течение следующих двух лет.

Амилоидные отложения служат причиной множества тяжелых и неизлечимых недугов, таких, например, как болезнь Альцгеймера. Однако ученые Туомас Ноулис из Кембриджского университета (Великобритания) и Маркус Бюхлер из Массачусетского технологического института (США), попробовав иначе взглянуть на существование амилоидов, предлагают различные биоинженерные направления, в которых они могут найти применение. Всякий белок имеет уникальную пространственную структуру, которую он приобретает в процессе сворачивания, или фолдинга. Она определяет всю жизнь белковой молекулы, с чем, как и когда она взаимодействует. Но у многих белков трехмерное строение может слегка измениться таким образом, что их молекулы начинают необратимо взаимодействовать друг с другом, формируя плотные отложения. Стоит образоваться «начальной точке» этого процесса, как в него начнут вовлекаться все новые и новые молекулы, плотные нерастворимые амилоидные тяжи растут и постепенно отравляют клетку, и если это происходит в нейронах головного мозга, мы получаем какое-нибудь нейродегенеративное заболевание. Но физико-химические характеристики амилоидов таковы, что позволяют приспособить их к выполнению некоторых специфических функций. Они необычайно устойчивы к различного рода повреждениям, что делает их удобными структурным материалом. Некоторые бактерии, в том числе кишечная палочка *Escherichia coli*, используют амилоидные отложения для прикрепления к поверхности или соединения клеток в колонии. Кроме своей устойчивости, амилоидные тяжи отличаются большой гибкостью, что делает их действительно удобным материалом для создания клеточной основы, в том числе в клеточных культурах.

Исследователи проанализировали структуру амилоидов и пришли к выводу, что она дает белковым тяжам прочность, позволяющую поспорить с шелковой нитью. При создании искусственных амилоидов первоочередной задачей будет научить обычные белки формировать эти прочные структуры «на заказ». По словам исследователей, этого можно добиться, введя в белковую молекулу ион металла: он подтолкнет белок к образованию нужной структуры, не изменив ее механических свойств. Кроме обычных биологических задач, вроде создания подложки-матрикса, на которой смогут расти культуры клеток, исследователи предлагают делать из амилоидов едва ли не нанопроволоку, организовывать с их помощью направленный рост полимеров при создании органических солнечных элементов, контролировать посредством амилоидных структур адресную доставку лекарств в ткани, а еще заживлять раны, использовать в водоотталкивающем покрытии и т.д.

А голландская дизайнер и биохимик Джалила Эссаиди с генетиками из Forensic Genomics Consortium сделала лучший бронжилет в мире... из человеческой кожи. Сначала генетики вывели трансгенных коз, в молоке которых содержится белок паутины – такой белок выделяют железы паука-золотопряда. Сплетенный в волокна, этот белок в десять раз прочнее стали. Затем этот белок добавили к культуре клеток кожи человека. И примерно за пять недель вырастили кусок пуленепробиваемой человеческой кожи. По словам автора проекта Джалилы Эссаиди, смысл ее изобретения в том, чтобы повысить безопасность человека в современном мире. После вживления пуленепробиваемой кожи человеку она сможет защитить его от любых аварий, природных катастроф, и, в частности, от «шальной бандитской пули».

Имплантируемый электрокардиостимулятор (ЭКС) размером меньше рисового зернышка создан в Колумбии, его массовое производство, возможно, начнется через пять лет, сообщил один из авторов изобретения доктор медицинских наук Хорхе Рейнольдс (Jorge Reynolds), выступая по колумбийскому телевидению. По его словам, в ближайшее

время прибор пройдет испытания на животных, а его массовое производство может начаться уже через пять лет. Имплантироваться пациенту он будет в амбулаторных условиях, и вся процедура займет не более 15 мин. За состоянием здоровья пациента врач сможет следить дистанционно. По мнению Рейнольдса, новый кардиостимулятор будет стоить около тысячи долларов, в то время как цена нынешних аппаратов составляет 12 тыс. долл. Электрокардиостимулятор, или искусственный водитель ритма (ИВР) предназначен для поддержания или навязывания частоты сердечных сокращений пациенту, у которого сердце бьется недостаточно часто или имеется электрофизиологическое разобщение между предсердиями и желудочками (атриовентрикулярная блокада). Первый такой прибор весил 50 кг, находился вне тела пациента, и импульсы к сердцу проводились по проводам через кожу, а ЭКС будет весить менее 1 г.

Американские биологи с большим успехом использовали старые номера газет для производства биотоплива. Исследователи из университета Тьюлейн обнаружили в фекалиях животных ранее неизвестный штамм бактерии, который назвали TU-103. Он примечателен тем, что производит непосредственно из целлюлозы топливо на основе бутилового спирта (butanol fuel). Причем TU-103 делает это в присутствии кислорода, что существенно удешевляет метод производства. Поэкспериментировав ради хохмы на газетах, биологи отметили, что «превращение» в бутанол целлюлозы, самого распространенного органического материала на Земле – сбывшаяся мечта многих ученых. Стало быть, мир на шаг приблизился к созданию недорогой, эффективной и экологичной альтернативы бензину.

Чувствительный прибор, разработанный немецкими учеными, облегчит задачу предотвращения терактов, поскольку способен обнаружить одну молекулу пентрита среди 10 миллиардов молекул воздуха. Пентаэритриттетранитрат (пентрит) является сверхмощным взрывчатым веществом: несколькими граммами можно разнести в клочья пассажирский автомобиль. Обнаружить его присутствие со

стоцентной вероятностью можно только с помощью лабораторных тестов методом исследования смывов с поверхностей или спектрометрии, анализирующей мобильность ионов (IMS). Служебные собаки практически неспособны унюхать пентрит, поскольку лишь незначительная часть его молекул попадает в окружающую среду. Неудивительно, что из-за этой «неуловимости» пентрит более чем популярен у террористов. Исследователи из Дармштадтского технического университета (Германия) разработали сенсор, который укреплен на квадратной пластинке со стороной 1 см. Когда молекула пентрита попадает в нанотрубку сенсора, входящие в состав взрывчатого вещества нитрогруппы тянут молекулу к внутренней поверхности трубки, что в итоге приводит к изменению проводимости устройства. Это изменение регистрируется электронной.

Инженеры предлагают встраивать датчик в стационарные металлодетекторы и сканеры либо создать портативный вариант, поместив устройство в ручной пылесос. Поскольку производства подобных сенсоров не потребует особых затрат, их можно устанавливать не только в аэропортах, но и перед входом в спортивные и торговые комплексы, отмечают создатели.

Природа вдохновила британских ученых на создание нового типа пористых материалов. Как замечает Кармен Торрес-Санчес из университета Хериота-Уатта, в природе нет однородных структур. Если внутри объекта есть пустоты, наблюдается их градиация: чем ближе к поверхности, тем они меньше. Это помогает достигать оптимального соотношения массы и прочности и предотвращает разрушение всей структуры даже при существенных повреждениях. Для имитации этого природного свойства г-жа Торрес-Санчес и ее коллега из университета Стратклайда Джонатан Корни применили к расплавленному полимеру низкочастотное маломощное воздействие ультразвуком. Регулируя интенсивность ультразвуковых волн, можно создавать полости разного размера и варьировать их распределение. Исследователи утверждают, что получаемый

после застывания материал имеет множество вариантов применения в строительстве, биомедицине и других областях.

Китайские ученые создали систему, которая может вырабатывать электричество, разлагая органические вещества, одновременно с этим очищая от органических соединений сточные воды. Янбяо Лю (Yanbiao Liu) с коллегами разработал фотокаталитическую топливную ячейку, электродами в которой являются анод, представляющий собой систему из титаноксидных (TiO<sub>2</sub>) нанотрубок и катод из платины. Используя энергию солнечного света, ячейка разрушает содержащиеся в сточных водах органические соединения, образующиеся при их разрушении электроны переходят к катоду, таким образом, химическая энергия конвертируется в электрическую. Лю отмечает, что органические соединения в сточных водах могут являться важным источником энергии – полная переработка всей органики, теряющейся со сточными водами, ежегодно могла бы обеспечить до трети от общемирового ежегодного потребления энергии. Таким образом, поиск не наносящих ущерба окружающей среде способов извлечения энергии из отходов, приводящих продуктов, не представляющей опасности, весьма актуален. Исследователи использовали разработанную ими топливную ячейку для очистки моделирующих сточные воды растворов от ароматических соединений, азокрасителей, фармацевтических соединений и средств личной гигиены. Все эти соединения разрушались в топливных ячейках, при этом происходило выделение энергии. Модификация электродов полупроводниками, например, сульфидом кадмия, позволяет системе использовать для разложения органических соединений свет видимой области спектра вместо ультрафиолета. По словам Лю, это означает, что новая система может использоваться для очистки сточных вод «под открытым небом», вне специально приспособленных камер с ультрафиолетовым излучением.

Как мы видим, реальные нанотехнологии могут сделать многое, что позволит значительно улучшить жизнь всего человечества.

## ДЛИТЕЛЬНАЯ ПРОЧНОСТЬ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.Н. ОБЛИВИН, проф. каф. процессов и аппаратов деревообрабатывающих производств, д-р техн. наук,

М.В. ЛОПАТНИКОВ, доц. каф. процессов и аппаратов деревообрабатывающих производств, канд. техн. наук

*prezident@mgul.ac.ru; lopatnikov@mgul.ac.ru*

В производстве композиционных материалов часто возникает вопрос о возможности прогнозирования прочностных характеристик композита не только на конечной стадии технологического процесса, но и в условиях эксплуатации, то есть возникает вопрос о возможности расчета длительной прочности композиционных материалов уже на стадии изготовления.

Прогнозирование изменения физических свойств композита во времени возможно при использовании математических моделей, описывающих как процесс изготовления, так и процесс эксплуатации композиционного материала.

На стадии изготовления математическая модель процесса переноса тепла и массы в композиционном материале должна учитывать возможные химические реакции при нагреве или охлаждении пористого тела, связанные с отверждением связующего, а также перенос жидкой влаги в составе парогазовой смеси, образующейся при ее неполном испарении. Кроме того, при наличии химических реакций может выделяться значительное количество неконденсирующихся газов, и поэтому необходимо учитывать их перемещение и взаимную диффузию неконденсирующихся газов и водяного пара.

После изготовления композиционный материал может эксплуатироваться в различных условиях окружающей среды, связанных с изменением влажности и температуры, а также и в агрессивных средах. При этом возникает необходимость прогнозирования времени эксплуатации такого материала, а это связано, прежде всего, с изменением его прочностных свойств. Вследствие воздействия нагрева и охлаждения, увлажнения и сушки возникают знакопеременные градиенты температуры и влажности, которые вызывают

знакопеременные внутренние напряжения, под воздействием которых последовательно разрушаются адгезионные и когезионные связи, приводя к разрушению композита, вследствие преждевременного «старения» связующего и его последующей деструкции.

С учетом вышеизложенного, система уравнений тепломассопереноса в одномерном случае, когда  $x = x_3$  (рисунок), в процессе изготовления может быть записана в следующем виде [1].

Принятые условные обозначения

$D$  – коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/с;

$E$  – энергия активации, Вт;

$K$  – коэффициент фильтрации, м/с;

$M$  – молярная масса, кг/моль;

$R$  – универсальная газовая константа;

$T$  – температура, К;

$U_0$  – энергия активации процесса разрушения (разрыва химической связи в твердом теле);

$W$  – влагосодержание, работа адгезии, Н;

$c$  – коэффициент теплоемкости, Дж/(кг·К);

$p$  – давление, Па;

$x$  – координата, м;

$\alpha$  – коэффициент теплообмена Вт/(м<sup>2</sup>·К);

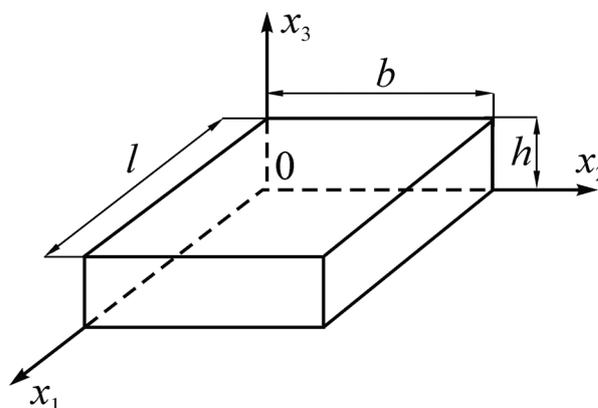


Рисунок. Система координат, принятая при моделировании ( $l$ ,  $b$ ,  $h$  – длина, ширина и толщина плиты)

$\beta$  – коэффициент массообмена, отнесенный к разности парциальных давлений, с/м<sup>2</sup>;

$\gamma$  – так называемый активационный объем, который характеризует объем, где разыгрывается элементарный акт процесса разрушения (разрыва связей);

$\varepsilon$  – деформация;

$\theta$  – степень отверждения полимерной матрицы, угол смачивания, рад;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

$\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;

$\sigma$  – напряжение, Па, энергия, Вт;

$\tau$  – время, с;

$\tau_0$  – частота тепловых колебаний индивидуальных атомов в твердом теле относительно их положений равновесия;

$v$  – скорость, м/с;

$\Pi$  – пористость;

$\mathcal{I}$  – функция штрафа;

1. Уравнение фильтрационного переноса парогазовой смеси

$$(\rho_{\text{п}} + \rho_{\text{г}})v = -K \frac{\partial}{\partial x} (p_{\text{п}} + p_{\text{г}}). \quad (1)$$

2. Уравнение неразрывности для водяного пара

$$\Pi \frac{\partial \rho_{\text{п}}}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho_{\text{п}} v - D \frac{\partial \rho_{\text{п}}}{\partial x} \right) + \rho_{\text{в}} \frac{\partial W}{\partial \tau} = M_{\text{п}} \bar{M} \rho_{\text{ск}} (1 - \Pi) \frac{\partial \theta}{\partial \tau}. \quad (2)$$

3. Уравнение неразрывности для неконденсирующихся газов

$$\Pi \frac{\partial \rho_{\text{г}}}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho_{\text{г}} v - D_{\text{г}} \frac{\partial \rho_{\text{г}}}{\partial x} \right) = M_{\text{г}} \bar{M} \rho_{\text{ск}} (1 - \Pi) \frac{\partial \theta}{\partial \tau}. \quad (3)$$

4. Уравнение переноса влаги в жидкой фазе

$$\rho_{\text{в}} v_{\text{в}} = -K_{\text{в}} W \frac{\partial}{\partial x} (p_{\text{п}} + p_{\text{г}}) - D_{\text{в}} \frac{\partial W}{\partial x}. \quad (4)$$

5. Уравнение переноса энергии жидкой и твердой фазами

$$\begin{aligned} [c_{\text{ск}} \rho_{\text{ск}} (1 - \Pi) + c_{\text{в}} \rho_{\text{в}} W + c_{\text{Р}} \bar{M} \rho_{\text{ск}} (1 - \Pi)] \frac{\partial T_{\text{ск}}}{\partial \tau} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda_{\text{ск}} (T_{\text{ск}}, W, \Pi) \frac{\partial T_{\text{ск}}}{\partial x} \right] + c_{\text{в}} \rho_{\text{в}} v_{\text{в}} \frac{\partial T_{\text{ск}}}{\partial x} + \end{aligned}$$

$$+ \alpha_{\text{в}} (T - T_{\text{ск}}) + \rho_{\text{в}} E_{\phi} \frac{\partial W_{\phi_2}}{\partial \tau} + E_{\text{Р}} \bar{M} \rho_{\text{ск}} (1 - \Pi) \frac{\partial \theta}{\partial \tau}. \quad (5)$$

6. Уравнение переноса энергии парогазовой смесью

$$\begin{aligned} \Pi (c_{\text{п}} \rho_{\text{п}} + c_{\text{г}} \rho_{\text{г}}) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + r \rho_{\text{в}} \frac{\partial W_{\phi_1}}{\partial \tau} + \\ + v (c_{\text{п}} \rho_{\text{п}} + c_{\text{г}} \rho_{\text{г}}) \frac{\partial T}{\partial x} + \alpha_{\text{в}} (T_{\text{ск}} - T). \quad (6) \end{aligned}$$

7. Уравнение фазовых переходов

$$\frac{\partial W_{\phi}}{\partial \tau} = \frac{\partial W_{\phi_1}}{\partial \tau} + \frac{\partial W_{\phi_2}}{\partial \tau}, \quad (7)$$

где

$$\frac{\partial W_{\phi_1}}{\partial \tau} = \begin{cases} \mathcal{I}_1 [p_{\text{пн}}(T) - p_{\text{п}}]^2, & p_{\text{п}} > p_{\text{пн}}(T); \\ 0, & p_{\text{п}} \leq p_{\text{пн}}(T); \end{cases} \quad (8)$$

$$\frac{\partial W_{\phi_2}}{\partial \tau} = \begin{cases} \beta_1 [p_{\text{пн}}(T_{\text{ск}}) - p_{\text{п}}], & p_{\text{п}} \geq p_{\text{пн}}(T_{\text{ск}}); \\ -\beta_2 [p_{\text{пн}}(T_{\text{ск}}) - p_{\text{г}}] \chi(W), & p_{\text{пн}}(T_{\text{ск}}) - p_{\text{г}} < p_{\text{пн}}(T_{\text{ск}}); \\ -\{\mathcal{I}_2 [p_{\text{пн}}(T_{\text{ск}}) - p_{\text{п}} - p_{\text{г}}]^2 + \\ + \beta_2 p_{\text{г}}\} \chi(W), & p_{\text{п}} < p_{\text{пн}}(T_{\text{ск}}) - p_{\text{г}}. \end{cases} \quad (9)$$

Здесь

$$\chi(W) = \arctg \left( \frac{W}{W_{\varepsilon}} \right). \quad (10)$$

8. Уравнение изменения влажности

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = \frac{\partial W_{\phi}}{\partial \tau} + \frac{\partial v_{\text{в}}}{\partial x}. \quad (11)$$

9. Уравнение химической реакции

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \begin{cases} (1 - \theta)^{n_1} f_1(T_{\text{ск}}, c_{\text{с}}, M), & \theta < \theta_{\text{Р}}(T_{\text{ск}}, c_{\text{с}}); \\ (\theta_{\text{н}}(T_{\text{ск}}) - \theta)^{n_2} f_2(T_{\text{ск}}, c_{\text{с}}, M), & \theta_{\text{Р}} \leq \theta \leq \theta_{\text{н}}(T_{\text{ск}}); \\ \theta \cdot f_3(T_{\text{ск}}, c_{\text{с}}, M), & \theta > \theta_{\text{н}}(T_{\text{ск}}), T_{\text{ск}} > T_{\text{кр}}. \end{cases} \quad (12)$$

10. Уравнение изменения концентрации реагентов химической реакции

$$\frac{\partial c_{\text{с}}}{\partial \tau} = \begin{cases} \frac{-c_{\text{с}}^2 \rho_{\text{в}}}{\bar{M} \rho_{\text{ск}} (1 - \Pi)} \cdot \frac{\partial W_{\phi}}{\partial \tau}, \\ \text{при водорастворимых реагентах;} \\ 0, \text{ при неводорастворимых реагентах.} \end{cases} \quad (13)$$

11. Уравнения состояния

$$\rho_{\text{п}} = \frac{p_{\text{п}}}{R(p_{\text{п}})T}; \quad (14)$$

$$\rho_{\text{г}} = \frac{p_{\text{г}}}{R_{\text{г}}T}. \quad (15)$$

Реализация системы (1–15) для различных граничных условий возможна лишь при получении дополнительных экспериментальных зависимостей: по теплофизическим характеристикам  $\lambda$ ,  $c$ ,  $\rho$ ,  $\mu$ ; коэффициентам проницаемости  $K$ , теплообмена  $\alpha$ ,  $\beta$  и т.д. Необходимо также знать основы кинетики процесса отверждения и закономерности перемещения жидкой влаги в пористом теле.

Сформулированную систему уравнений несложно обобщить на многомерный случай. Для конкретных краевых условий эта система имеет единственное решение.

Следует заметить, что большинство композиционных материалов изготавливают при условии пьезогидробаротермических воздействий. Интенсивность пьезовоздействий во многом определяется процессами теплопереноса, поскольку деформативные свойства (такие как пластичность, упругость, ползучесть и т.д.) материала зависят от температуры, влажности и степени завершенности химических реакций. В свою очередь, коэффициенты переноса тепла и массы, а также скорость химических реакций, зависят от плотности, а следовательно, от локальных относительных деформаций материала. Так, изменение влажности приводит к разбуханию; изменение температуры – к термическому расширению (сжатию); при химических реакциях часто изменяется плотность материалов; память наследственных материалов зависит от температуры, влажности, напряжений и деформаций; при сжатии материалов повышается их температура и т.д. Сказанное свидетельствует о наличии взаимосвязи процессов теплопереноса и деформативности в композиционных материалах.

Как правило, композиционные материалы, в частности материалы на основе древесины, относятся к материалам с реономными свойствами. Соотношения между напряжениями и деформациями для материалов с реономными свойствами определяются реологическими уравнениями состояния.

Авторами [1] для процессов изготовления материалов с термореактивными наполнителями, например древесно-стружечных плит, предложено использовать следующее реологическое соотношение

$$\begin{aligned} \varepsilon(x, \tau) = & G[T(x, \tau), W(x, \tau), \theta(x, \tau), \rho_0(x)] + \\ & + \Phi[T(x, \tau), W(x, \tau), \theta(x, \tau), \rho_0(x)] \cdot (\sigma(x, \tau) - \\ & - z(x, \tau)) + \int_0^{\tau} R[T(x, \tau - t), W(x, \tau - t), \\ & \theta(x, \tau - t), \rho_0(x)] \cdot \sigma(x, t) dt. \end{aligned} \quad (16)$$

Функция  $G[T(x, \tau), W(x, \tau), \theta(x, \tau), \rho_0(x)]$  в уравнении (16) учитывает температурное расширение, разбухание при увлажнении и усадку связующего при отверждении термореактивного наполнителя. Функция  $z(x, \tau)$  – диссипацию энергии деформации. Величина, обратная функции  $\Phi$ , в уравнении (16) представляет собой аналог модуля упругости.

В целом ядро релаксации  $R$  в уравнении (16) является нестационарным, так как в процессе изменяются значения температуры, влажности и степени завершенности химических реакций (степени отверждения). Однако при постоянных температуре, влажности и степени отверждения связующего ядро  $R$  в уравнении (16) превращается в функцию только аргумента запаздывания  $\tau - t$ .

Для определения этого ядра используют методы идентификации нелинейных объектов, достаточно хорошо развитые в теории систем управления.

Для описания функции  $z$ , учитывающей диссипацию энергии сжатия, авторами предложено следующее уравнение

$$\begin{aligned} \frac{dz(x, \tau)}{d\tau} = & A[T(x, \tau), W(x, \tau), \theta(x, \tau), \rho_0(x)] \times \\ & \times \{ \sigma(x, \tau) - \sigma_k[T(x, \tau), W(x, \tau), \\ & \theta(x, \tau), \rho_0(x)] - z(x, \tau) \}; \end{aligned} \quad (17)$$

$$z(x, 0) = 0. \quad (18)$$

Функция  $\sigma_k[T(x, \tau), W(x, \tau), \theta(x, \tau), \rho_0(x)]$  представляет собой зависимость напряжения покоя (напряжение, при котором прекращается диссипация энергии напряжения) от текущей температуры, влажности, плотности и степени отверждения. Эту зависимость также можно найти методами идентификации систем управления.

Следует отметить, что для нахождения функциональных зависимостей  $G$ ,  $\Phi$ ,  $R$ ,  $\sigma_k$  желательно рассмотреть механизм нагружения исследуемого материала. Это в значи-

тельной степени облегчит аппроксимацию полученной информации аналитическими зависимостями [1].

Для описания влияния деформирования на теплоперенос следует в уравнение переноса энергии включить источник, описывающий переход энергии деформирования в тепло. Кроме этого, необходимо учитывать, что при деформировании изменяется плотность материала, а это, в свою очередь, влияет на коэффициенты переноса. Изменение плотности материала можно описать зависимостью

$$\rho(x, \tau) = \rho_0(x) \cdot (1 + \varepsilon(x, \tau)). \quad (19)$$

Следует заметить, что в большинстве практически важных случаев член, учитывающий источник тепла в уравнении энергии за счет диссипации энергии деформации, составляет не более 1–5 % от остальных членов и, следовательно, им часто пренебрегают. Однако зависимость коэффициентов переноса от деформации (через изменение плотности) практически всегда играет важную роль в процессах теплопереноса.

Следует отметить, что для решения сформулированных систем уравнений, как правило, применяются численные методы [2].

Как следует из анализа основных положений, изложенных выше, для проектирования технологий изготовления композиционных материалов необходимо учитывать все многообразие физических, химических, механических процессов, участвующих в формировании свойств материала. При этом возникает необходимость совместного рассмотрения сформулированных физико-математических моделей для всего многообразия протекающих процессов. Для реализации предлагаемых моделей необходимы замыкающие связи между физическими параметрами, входящими в сформированные системы дифференциальных уравнений. Такой подход позволит разработать расчетные схемы технологических процессов производства композиционных материалов. Изменяя в широком диапазоне краевые условия для численного анализа сформированных систем дифференциальных уравнений, можно прогнозировать основные параметры технологического процесса, а также и свойства получаемых материалов.

Таким образом, система уравнений (1–11), дополненная реологическими уравнениями (16–19), при сформулированных граничных условиях и замыкающих связях позволяет в основном получить качественные характеристики изготавливаемого материала и прогнозировать его свойства.

Применительно к изготовленным композиционным материалам с древесными наполнителями система уравнений (1–11) претерпит некоторые изменения. При эксплуатации композит может подвергаться воздействию влаги и перепадам температуры, что, безусловно, будет вызывать его разбухание или усушку, а механизм переноса массы (влаги) будет в основном диффузионным. Поэтому в системе уравнений (1–11) изменится запись уравнения (1), а допущение, что на стадии изготовления процесс отверждения реализовался полностью, отсутствуют обратимые химические реакции, а доля доотверждения связующего на стадии эксплуатации незначительна, позволит нам исключить из системы уравнение (3).

Таким образом, для сформулированных выше условий система уравнений (1–11) запишется как

1. Уравнение переноса влаги в жидкой фазе

$$\rho_e v_e = K_e W \frac{\partial}{\partial x} (p_n + p_e) - D_e \frac{\partial w}{\partial x}. \quad (20)$$

2. Уравнение переноса энергии жидкой и твердой фазами

$$c_{ck} \rho_{ck} (1 - \Pi) + c_e \rho_e W + c_n \rho_n (1 - \Pi) \frac{\partial T_{ck}}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \times \left[ \lambda_{ck}(T_{ck}, W, \Pi) \frac{\partial T_{ck}}{\partial x} + c_e \rho_e v_e \frac{\partial T_{ck}}{\partial x} \right] \pm \rho_e \frac{\partial W_{\phi 1}}{\partial \tau}. \quad (21)$$

3. Уравнение переноса энергии парогазовой смесью (в случае нагрева композита)

$$\Pi (c_n \rho_n + c_e \rho_e) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + r \rho_e \frac{\partial W_{\phi 1}}{\partial \tau} + v (c_n \rho_n + c_e \rho_e) \frac{\partial T}{\partial x}. \quad (22)$$

4. Уравнение фазовых переходов (в случае нагрева композита)

$$\frac{\partial W_{\phi}}{\partial \tau} = \frac{\partial W_{\phi 1}}{\partial \tau} + \frac{\partial W_{\phi 2}}{\partial \tau}, \quad (23)$$

где

$$\frac{\partial W_{\phi 1}}{\partial \tau} = \begin{cases} \Pi [p_{nn}(T) - p_n]^2, & p_n > p_{nn}(T); \\ 0, & p_n \leq p_{nn}(T); \end{cases} \quad (24)$$

$$\frac{\partial W_{\phi_2}}{\partial \tau} = \begin{cases} \beta_1 [p_{\text{пн}}(T_{\text{ск}}) - p_{\text{п}}], p_{\text{п}} \geq p_{\text{пн}}(T_{\text{ск}}); \\ -\beta_2 [p_{\text{пн}}(T_{\text{ск}}) - p_{\text{г}}] \chi(W), \\ p_{\text{пн}}(T_{\text{ск}}) - p_{\text{г}} < p_{\text{пн}}(T_{\text{ск}}); \\ -\{Ш_2 [p_{\text{пн}}(T_{\text{ск}}) - p_{\text{п}} - p_{\text{г}}]^2 + \\ + \beta_2 p_{\text{г}}\} \chi(W), p_{\text{п}} < p_{\text{пн}}(T_{\text{ск}}) - p_{\text{г}}. \end{cases} \quad (25)$$

$$\chi(W) = \arctg \left( \frac{W}{W_{\varepsilon}} \right). \quad (26)$$

5. Уравнение изменения влажности

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = \frac{\partial W_{\phi}}{\partial \tau} + \frac{\partial v_{\text{в}}}{\partial x}. \quad (27)$$

Из приведенных уравнений (20–27) мы можем определить изменение температуры и влажности в композите при знакопеременных граничных условиях по температуре и влажности, а система реологических соотношений позволит определить его интегральные прочностные характеристики в условиях эксплуатации.

Для того чтобы понять, каким образом будут происходить изменения прочности на более низких уровнях – макро- и наноуровне, необходимо исследовать изменение структуры материала на молекулярном уровне как внутри самого материала, так и на границах раздела фаз материала в процессе воздействия на него внешней среды. Это позволит оценить адгезионные и когезионные характеристики материала, являющиеся определяющими при эксплуатации композита, которые, в свою очередь, также зависят от внешних факторов (влажности и температуры), а также полей распределения влажности и температуры внутри материала.

В связи с тем, что основным компонентом, сохраняющим форму и формирующим структуру композита, является связующее, в нашем случае полимер, безусловно, необходимо в первую очередь рассматривать изменение его адгезионных и когезионных характеристик, так как они вносят основной вклад в прочность композита как на стадии его формирования, так и на стадии его эксплуатации.

Адгезия полимеров к твердым поверхностям является одним из основных факторов, определяющих свойства любых полимерно-композиционных материалов. В древесных композиционных материалах с полимерной матрицей адгезия на межфазной

границе обуславливает совместную работу древесных частиц и матрицы, возможность межслоевого сдвига при деформации и другие физико-механические свойства.

Проблема адгезии сложна и включает разные аспекты: химические, физические и механические. Существует множество теоретических подходов к описанию и объяснению явлений адгезии, которые изложены в работах Б.В. Дерягина, А.Д. Зимова, А.А. Берлина, В.Е. Басина и др. Однако ни одна из существующих теорий не дает возможности рассчитать энергию адгезионного взаимодействия и прочность адгезионного соединения. Это обусловлено тем, что и на собственно адгезию, и на адгезионную прочность одновременно влияет большое число разнородных факторов, которые не могут быть учтены в рамках одной какой-либо теории.

Адгезию (прилипание двух тел друг к другу) можно охарактеризовать термодинамической величиной работы, которую надо совершить для разделения в равновесных условиях двух приведенных в контакт разнородных тел. Сцепление двух тел обусловлено всем спектром взаимодействий – это молекулярные, химические, водородные, межмолекулярные связи, силы Казимира и т. д.

Исходными посылками для термодинамического описания адгезии служат характеристики двух поверхностей – их поверхностное и межфазное натяжение на границе раздела двух фаз. Для простейшего случая контакта двух жидкостей с поверхностными натяжениями  $\sigma_{\text{ж1}}$  и  $\sigma_{\text{ж2}}$  межфазное натяжение на границе раздела, как правило, меньше наибольшего поверхностного натяжения на границе с насыщенным паром

$$\sigma_{\text{ж1,2}} = \sigma_{\text{ж1}} - \sigma_{\text{ж2}}. \quad (28)$$

Эмпирическое соотношение (28) получило наименование правила Антонова.

Разделение двух поверхностей (отрыв их друг от друга в направлении, перпендикулярном поверхности раздела) требует работы в расчете на единицу поверхности

$$W_{\text{ад}} = \sigma_{\text{ж1}} + \sigma_{\text{ж2}} - \sigma_{\text{ж1,2}}. \quad (29)$$

Уравнение (29) применимо в любом случае, в том числе, когда один из компонентов – твердое тело. Соответственно энергия

когезии есть работа разрушения и последующего образования единицы поверхности данного тела. Поскольку единственным результатом изотермического процесса в данном случае является образование двух новых поверхностей, обладающих поверхностной энергией  $\sigma$ , то термодинамическую работу когезии можно выразить как

$$W_k = 2 \cdot \sigma. \quad (30)$$

При смачивании твердого тела жидкость образует определенный краевой угол  $\theta$ . Состояние механического равновесия капли (без учета гравитации) на поверхности определяется соотношением Юнга-Дюпре

$$\sigma_{тг} = \sigma_{жт} + \sigma_{жт} \cdot \cos\theta. \quad (31)$$

Совместным решением уравнений (3) и (4) находят термодинамическую работу адгезии между жидкостью и твердым телом

$$W_{ад} = \sigma_{жт} \cdot (1 + \cos\theta). \quad (32)$$

При  $\theta = 0$  поведение капли определяется условием

$$\cos\theta = 2 \cdot \sigma_{жт}. \quad (33)$$

Без наличия соответствующего оборудования, прямыми методами исследования, по приведенным выше зависимостям, не представляется возможным количественно оценить адгезионную и когезионную прочность композита. Приведенные авторами [3] данные показывают, что оцененные значения прочности твердого тела в слоях нанометрового диапазона при уменьшении толщины покрытия ниже примерно 15 нм на порядок превосходят прочность блочного материала, что доказывает, что прочность твердого тела зависит от его размеров в нанодиапазоне. Чем меньше размер, тем выше прочность, что ранее доказывала только теория. Таким образом, прямыми экспериментами показано, что прочность твердого тела не является константой материала, а зависит от времени действия нагрузки, ее величины и температуры и может быть определена по известному уравнению С.Н. Журкова [3]

$$\tau = \tau_0 \exp[(U_0 - \gamma\sigma) / RT], \quad (34)$$

В связи с тем, что длительная прочность определяется свойствами полимерной матрицы, то прочностные, адгезионные и когезионные характеристики во многом зависят от свойств самого связующего. В настоящее время выполнено достаточно много работ,

связанных с модификацией клеевых соединений различного рода добавками. Химический механизм этих добавок сегодня неясен, все оценивается интегральным эффектом, и в основном изменение состояния материала описывается качественными характеристиками. Изучение механизма воздействия положительных и отрицательных температур, влажности и сушки на само клеевое соединение является основой создания композиционного материала с заданной прочностью, но неясен механизм модификации клеевых соединений.

Очевидно, что модификация связующего происходит на молекулярном уровне, приводя к изменению его свойств, и здесь, очевидно, можно говорить о модификации поверхностных явлений на наноуровне. Для количественного описания процессов, происходящих в самом связующем, а также на границе раздела наполнитель–связующее необходимо рассмотреть вопросы, связанные с изучением состава самого связующего и возможностью его модификации, а также вопросы, связанные с изменением во времени структуры материала на наноуровне как результат воздействия на материал отрицательных и положительных температур, усушки и влажности. Тогда решение вопросов, связанных с модификацией связующего, стало бы носить не поисковый, а научный характер, появилась бы возможность моделирования состава материалов на основе полимерных связующих, подбора соответствующей технологии изготовления композитов с заранее заданными свойствами путем включения в их состав нанодобавок, а также возможность прогнозирования изменений длительной прочности композита при его эксплуатации.

### Библиографический список

1. Моделирование свойств и процессов прессования реактопластов: Монография / под общ. ред. А.Н. Обливина; МГУЛ. – М.: МГУЛ, 2005. – 283 с.
2. Обливин, А.Н. Процессы и аппараты химической технологии: учебник для студ. вузов, обуч. по спец. 240406 «Технология химической переработки древесины»/ А.Н. Обливин, Н.С. Прокофьев, А.И. Киприанов. – М.: МГУЛ, 2010. – 623 с.
3. Обливин, А.Н. Нанотехнологии и наноматериалы в лесном комплексе: Монография / А.Н. Обливин, М.В. Лопатников, В.А. Брынцев и др. – М.: МГУЛ, 2011. – 221 с.

## ЛЕСНЫЕ ПОЖАРЫ И АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЛЕСОВОССТАНОВЛЕНИЯ НА ГАРЯХ

М.Г. АДАМОВ, *проф. каф. лесоводства Дагестанского ГУ, д-р с.-х. наук,*  
Р.М. АДАМОВА, *с. н. с. каф. лесоводства Дагестанского ГУ,*  
Ш.Б. БАГАНДОВ, *Дагестанский ГУ,*  
Х.М. ГАМЗАТОВА, *Дагестанский ГУ*

*raika25@mail.ru*

«Лес должен принадлежать государству, и государство должно быть хозяином в нем» – писал основоположник учения о лесе профессор Г.Ф. Морозов. Леса России занимают 1143,6 млн га (69 % территории страны). Россия является абсолютным мировым монополистом, обладая почти половиной мировых ресурсов лесов бореальной и умеренной зон, и играет ключевую роль в сохранении глобального биоразнообразия и поддержания биосферных функций планеты. В лесах России зарегистрировано более 180 аборигенных видов древесных и кустарниковых пород, лесные земли занимают 75,4 % общей площади лесного фонда, из которых 89,3 % покрытые и 10,7 % непокрытые лесной растительностью.

Основные лесобразующие древесные породы: лиственница (35,8 %), сосна (15,7 %), ель (10,2 %), кедр (5,5 %), пихта (2,0 %), береза (13,8 %), дуб (6,9 %), бук (5,0 %), осина (2,5 %), они занимают 89,8 % площади, прочие древесные породы на площади менее 1 %, на остальной части земель (9,2 %) произрастают кустарники, кустарнички.

Недревесные ресурсы России имеют огромные запасы: дикорастущие ягоды более 8 млн т, съедобных грибов – 4,5 млн т, кедровые орехи около 1 млн т. Велика в России численность охотничьей фауны. На территории РФ сосредоточено около 25 % мировых запасов древесины на корню, но поскольку они используются нелегально и неэффективно, доля лесного комплекса России в экономике страны составляет всего 1,3 % от внутреннего продукта. В органах управления лесами занято 44,3 тыс. чел., в том числе 36,4 тыс. чел. работает в 1487 лесничествах, в органах государственного лесного контроля и надзора, пожарного надзора – 12 тыс. чел. (27,1 %). В

аренду представлено 36 тыс. лучших лесных участков на площади 178 млн га (15,5 %), в том числе заготовка древесины проводится по заявительной системе по Лесному кодексу РФ (2006 г.) на 6,6 тыс. лесных участках на площади 143 млн га.

В комментариях к Указу Президента РФ от 27.08.2010 г. № 1074 отмечается, что Лесной кодекс РФ от 04.12.2006 г. № 200-ФЗ во многом способствовал разрушению системы государственного управления лесами, 10 лет беспорядочных реформ в лесном секторе привели к настоящему хаосу и фактически стали причиной пожарной катастрофы в стране. К лету 2010 г. на деле лесная служба оказалась недееспособной, а Рослесхоз был лишен самостоятельности. К примеру, из 80 тыс. лесников было уволено более 60 тыс. человек. Президент России Д.А. Медведев также указывает, что только в 2010 г. из федерального бюджета выделено 15 млрд, в т.ч. 2,2 млрд руб. на охрану лесов от пожаров, а леса находятся практически без охраны, и контроля там никакого нет [1]. Вдумайтесь, призывает Президент, при запасах древесины 81,4 млрд м<sup>3</sup> 33 % этого экспортного ручейка составляет лес-кругляк. Поэтому академики: А. Исаев (РАН), Н. Моисеев и А. Писаренко (РАСХН), А. Петров (РАЕН) и другие известные специалисты в области лесного хозяйства указывают, что Лесной кодекс РФ (2006 г.) является образцом некачественного законодательства, нуждается не в поправках, а коренной переработке [3].

Подтверждая это, В.А. Зубков признает, что вопросы организации и ведения лесного хозяйства были разбросаны в шести федеральных ведомствах (Минпромторг, Минэкономики, Минприроды, Рослесхоз, Россельхознадзор, Росприроднадзор), сейчас по

указу Президента РФ они переданы одному – Рослесхозу [2]. В прежней структуре управления Рослесхоз был не вправе давать обязательные для субъектов РФ предписания об устранении выявленных нарушений, а также привлечении к ответственности должностных лиц, исполняющих обязанности по осуществлению государственного лесного контроля и государственного пожарного надзора в лесах. Парадокс – ведомство, которое непосредственно должно осуществлять контроль, было отстранено от этого.

Действительно, если до недавнего времени каждый участок леса имел своего государственного хозяина – лесничего, были вышки, связь, техника и унифицированные системы предупреждения, сейчас ничего этого нет.

Мы еще раз убедились в собственной безответственности, указывает Е. Тоголуков, 90 % очагов возгорания в лесах возникает по вине человека. К тушению лесных пожаров привлекалось 166 120 чел. и 22 572 ед. техники, из них 68 воздушных судов, в том числе от МЧС России – 129 171 чел. и 19341 ед. техники, из них 24 воздушных судна. Нанесен

Т а б л и ц а

**Количество лесных пожаров и площадь гарей за 2001–2010 гг. по данным Агентства по лесному хозяйству Республики Дагестан**

Годы	Кол-во пожаров	Площадь, га
2001	6	63
2002	0	0
2003	0	0
2004	0	0
2005	0	0
Всего за 5 лет (2001–2005 гг.)	6	63
В среднем за 1 год до принятия Лесного кодекса (2006 г.)	1,2	12,6
2006	6	293
2007	8	60
2008	22	235,5
2009	3	49,5
2010	23	490
Всего за 5 лет (2006–2010 гг.)	62	1128
В среднем за 1 год после принятия нового Лесного кодекса (2006 г.)	12,4	225,6

огромный ущерб лесному хозяйству страны. По состоянию на 1 октября 2010 г. он оценивается 85,5 млрд руб., пожары уничтожили леса на площади 2,1 млн га. Видя такой беспредел, комитет Госдумы РФ по природным ресурсам, природопользованию и экологии направил запрос в Генпрокуратуру и Рослесхоз о проведении проверок по исполнению органами государственной власти субъектов по расходованию средств, выделенных федеральным центром на охрану лесов от пожаров и тушение пожаров. Передав полномочия субъектам, государство добровольно отказалась от своих лесов, перестало быть хозяином в них [4].

Не лучше (если не хуже) ситуация и в Республике Дагестан, только здесь нет крупных лесных олигархов с незаконными рубками, однако в 2010 г. было 23 лесных пожара, на площади 490 га, из них на землях, покрытых лесом 260 га. Первый пожар – 15 июня, последний 12 ноября, т.е. в течение 6 месяцев здесь тушили пожары. Наиболее крупный из них в Пригородном лесничестве, где сгорел лес на площади 51 га. О фактическом отсутствии лесной охраны указывают повторяющиеся пожары в одних и тех же лесничествах. Например, в Махачкалинском лесничестве четыре пожара – 15 июня (1 га), 27 июля (7,0 га), 3 августа (3,0 га), 4 августа (11,0), в Магарамкентском лесничестве четыре пожара – 04 августа (7,0 га), 9 августа (23га), 10 августа (24 га), 01 сентября (6 га). За 6 дней в начале августа 4, 9 и 10 – пожаров в одном лесничестве слишком много и это показатель отсутствия хозяина и контроля.

Показательны в этом плане и данные по лесному хозяйству Республики Дагестан. Сравнение фактических данных только двух пятилеток (2001–2005 гг.) и (2006–2010 гг.) показывает, когда в лесхозах проводилась элементарная хозяйственная работа, работники лесхозов находились в лесах (2001–2005 гг.), лесных пожаров по всей республики практически не было, тогда как после их ликвидации и перехода к так называемому лесоуправлению, контролю, надзору и прочему бумаготворчеству (все бросили леса и перешли в конторы) леса начали гореть и с каждым годом все больше и больше (таблица).

Как видно, по этим данным невозможно установить связь горимости лесов ни с различиями температуры, ни с сухостью горючих материалов, ни с вертикальной зональностью. Леса горели там, где было неосторожное обращение людей с огнем. В 2010 г. не было ни одного пожара в 13 лесничествах из 25 (52 %), в 5 лесничествах (20 %) было по одному пожару, в 5 лесничествах (20 %) по 2 пожара и в 2 лесничествах (8 %) по четыре пожара (рисунок).

Естественно, что никем не охраняемые леса начали гореть чаще и наносить ущерба больше. Следовательно, леса нужно охранять независимо от того, за кем они числятся. При Петре I сажали корабельные леса, в 1949–1951 гг. проводились крупномасштабные посадки государственных лесных полос. Сейчас все они горят и незаконно вырубаются, и никого за это не наказывают. На наш взгляд, всем структурам власти необходимо признать, что были допущены крупные ошибки, их надо своевременно исправлять.

При лесных пожарах самый большой урон наносится микоризе, сотни и тысячи видов грибов-микоризообразователей полностью сгорают вместе с почвенным углеродом. При отсутствии микоризы семена многих лесных растений не прорастают, поэтому многие гари десятилетиями не зарастают [5]. В лесной экологической системе существуют налаженная биологическая связь, состоящая в основном из следующих простых компонентов: растения – вода – грибной компонент почвы, связанный с корневой системой (микориза).

Вода сама по себе не может подниматься из глубин почвенных горизонтов, ее поднимают корневые волоски и гифы грибов и снабжают растения, верхним насосом служат листья (транспирация). Излишки этой воды наряду с дождевой и талой водой накапливаются в подземных пещерах и пустотах, постепенно изливаются в виде родников. Лесной покров в первую очередь формирует дожди над самим лесом, предотвращает засухи, ураганы, оползти, наводнения. Корневые системы деревьев, как арматурная сеть в бетоне, предохраняют почвы от водной эрозии на скло-

нах любой крутизны. Ни при каких ливнях в лесах не наблюдается смыв почвы, всю воду поглощает лесная подстилка и трубная сеть микоризы. Поэтому нельзя рубить леса, вывозить за рубеж, их следует очень бережно использовать для удовлетворения внутренних нужд страны. Мы никогда не видели и не увидим в продаже зарубежного круглого леса и пиломатериалов на рынке и в лесоторговых базах.

У наших соседей в Финляндии 75 % площади страны покрыто одними торфяниками, но каждый участок ухожен, опоясан минерализованными полосами, все они имеют вокруг противопожарные канавы, заполненные водой, такое же ведение лесного хозяйства в Норвегии, Швеции, в Канаде, хотя они расположены в менее пожароопасных широтах. Пожар в лесу в этих странах рассматривается как чрезвычайное происшествие, в их лесах не может быть шашлычников, пьяных компаний с кострами, даже использованные пакеты они не сжигают (опасно для микоризы), а собирают в специальных ямах. Там нет захламленности, сучьев, их собирают, перерабатывают и продают нам как высококачественную финскую бумагу и картон.

Э. Шульте, ссылаясь на постановление ЕЭС № 2158/91 о защите лесов в Европейском Союзе от пожаров, указывает, что примерно 50 % средств (123,7 млн евро на период 1992–2002 гг.) было использовано для создания и усовершенствования лесной инфраструктуры, нацеленной на профилактику (**точки водоснабжения**, лесные дороги, противопожарные просеки и лесохозяйственные мероприятия). В настоящий момент основное финансирование по профилактике лесных

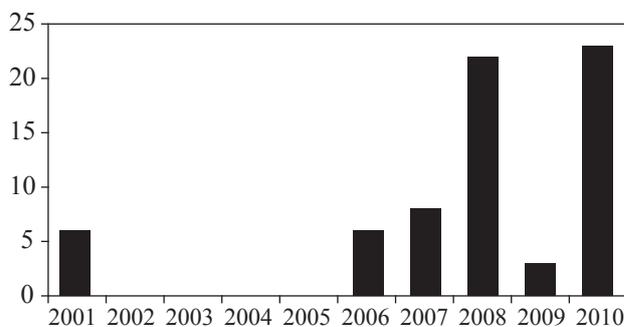


Рисунок. Количество лесных пожаров в Республике Дагестан за 2001–2010 гг.

пожаров и восстановление их после пожаров поступает в рамках реализации политики развития именно сельских, т.е. лесных районов [7]. У нас все наоборот: ни в Лесном кодексе РФ (2006 г.) и ни в одном из постановлений правительства нет ни одного слова о точках водоснабжения и о сохранении лесных поселений, близко расположенных к лесам. Поэтому возникают очевидные вопросы: как без воды тушить пожары и как спасать населенные пункты, если в них нет воды и ни одного пожарного водоема. Родники высохли в результате незаконных рубок лесов, уже появились селения – «Водные беженцы».

В горных условиях катастрофические пожары, полностью уничтожающие лесную среду и особенно почву до ее минерального состава, интенсивно формируют оползни и процессы оврагообразования вплоть до образования новых глубоких ущелий.

В течение длительного времени на стенках вновь образовавшихся естественных обвалов и разрезов, как показали наши исследования, наблюдается «плач почвы». Подземная вода, лишившись основных потребителей, после рубок и пожаров, т.е. крупных деревьев, постепенно сливается в овраг, формируя новый пожарный рефугиум-барьер между соседними участками, поскольку у природы нет другого способа борьбы с пожарами.

Такие родниковые ущелья в предгорьях и в горах имеют большую ценность, играют исключительную роль в последующей динамике лесовосстановительных сукцессионных процессов, начиная с сохранившихся краевых точек, прилегающих к водотокам.

Следовательно, единая экологическая система: лес – родник – пожарный рефугиум нельзя нарушать, чтобы не пришлось потом все бросать и переселяться в города или ближе к берегам больших рек, как это происходит в настоящее время. До последних 20–25 лет лес вокруг родника был запретным, чуть ли не святым местом. В период безработицы браконьеры и бизнесмены начали вырубать доступные, бесхозные, никем не охраняемые леса, теперь они утверждают, что не знали этих последствий и лишают свои

семьи и живность питьевой воды, вынуждены уходить из собственных селений из-за ее отсутствия.

После многократных обращений ученых республики на официальном уровне признано наличие проблем, требующих неотложного решения в горных поселениях. 16 декабря 2010 г. вступил в силу Закон Республики Дагестан «О горных территориях Республики Дагестан», № 72 который устанавливает правовые основы развития горных территорий, сохранения и рационального использования их природных ресурсов [8]. Особо ценным в этом Законе является пункт 4 статьи 4, которая предусматривает создание условий для сокращения массового оттока населения и закрепления молодежи в горных населенных пунктах. Следовательно, в первую очередь необходимо решить проблему с питьевой водой. Заслуживает внимания статья 8 о государственных приоритетах. В ней 19 направлений, в частности п. 2 – создание лабораторий и опытных баз для развития наукоемких производств, п. 9 – развитие лесного хозяйства, п. 18 – создание условий для работы в горных территориях выпускников высших и средних профессиональных учебных заведений, в том числе и инженеров лесного хозяйства. Таким образом, охрана лесов, лесных поселков, лесной экологической среды от пожаров, их обеспечение водой фактически является основой для решения всех остальных проблем.

### Библиографический список

1. Медведев, Д.А. Стратегический ресурс России / Д.А. Медведев // Наша власть: дела и лица. Спецвыпуск, 2010 г. Жизни основа – леса. – М.: Издательский дом «НВ – Медиа» 2010. – С. 14–15.
2. Зубков, В.А. Государственной лесной политике – быть / В.А. Зубков // Наша власть: дела и лица. Спецвыпуск, 2010 г. – М.: Издательский дом «НВ – Медиа», 2010. – С. 16.
3. О чем шумит русский лес? Интервью ред. журнала «Наша власть: дела и лица с академиками». Спецвыпуск, 2010 г. Жизни основа – леса. – М.: Издательский дом «НВ – Медиа», 2010. – С. 22–23.
4. Новые приоритеты под сенью законов / Е. Туголуков // Наша власть: дела и лица. Жизни основа – леса. – М.: Издательский дом «НВ – Медиа», 2010. – С. 17.

5. Адамова, Р.М. Методика осуществления дельней интродукции древесных пород / Р.М. Адамова // Биологические и гуманитарные ресурсы развития горных регионов. Материалы Международной научной конференции 10–12 сентября 2009 г. – Махачкала, 2009. – С. 193–195.
6. Рекомендации парламентских слушаний на тему: «Развитие системы правового обеспечения охраны лесов от пожаров» от 23 сентября 2010 г. // Устойчивое лесопользование. № 3(25) 2010. – С. 9–12
7. Шульте, Э. Борьба с лесными пожарами в Европейском Союзе // Устойчивое лесопользование. № 3(25) 2010. – С. 7–9.
8. Закон Республики Дагестан «О горных территориях Республики Дагестан»// Дагестанская правда, 19 декабря 2010 г. – С. 2.

## СТРОЕНИЕ ТОПЛЯКОВОЙ ДРЕВЕСИНЫ ДУБА

П.А. АКСЕНОВ, *зав. лабораторией каф. селекции, генетики и дендрологии МГУЛ, канд. с.-х.наук.*  
В.В. КОРОВИН, *проф. каф. селекции, генетики и дендрологии МГУЛ, д-р биол. наук*

*axenov.pa@mail.ru; vladimir.v.korovin@gmail.com*

Изучение микро- и наноструктуры древесины мореного дуба – важный этап в осмыслении процессов, происходящих в древесине при ее длительном контакте с водной средой. Знание механизмов естественного образования древесины мореного дуба необходимо для научного обоснования и дальнейших разработок искусственных ускоренных методов получения декоративной мореной древесины. Изучением микроструктуры нативной древесины различных видов рода *Quercus* L. занимались многие авторы [1–5 и др.]. Микроструктура древесины мореного дуба в литературных источниках описана крайне слабо.

Работа проводилась с высушенными до нормализованной влажности  $W = 12\%$  образцами древесины мореного дуба из Воронежской области возрастом не менее 1000 лет (возраст определен методом радиоуглеродного анализа).

Радиальный прирост исследуемой древесины колеблется в пределах 1,3–2,7 мм. Средний радиальный прирост составляет  $2,4 \pm 0,1$  мм. Представленная древесина имеет темно-бурый (почти черный) цвет. Радиальные трещины узкие (0,1–0,3 мм), встречаются редко (0,5–1 на 1 см в тангенциальном направлении). Измерение усушки проводилось по стандартной методике. Радиальная усушка составила  $5,39 \pm 0,03\%$ , тангенциальная –  $10,92 \pm 0,04\%$ .

Для стереомикроскопических исследований (получение фотографий поверхнос-

тей с увеличением не более  $100\times$ ) торцевую, тангентальную и радиальную поверхность образцов шлифовали с помощью ленточной шлифовальной машины со средней зернистостью наждачного полотна. Затем поверхность зачищали с помощью острого ножа и, на последней стадии, с помощью санного микротомы МС-2 (с минимальным углом отклонения ножа). Микроскопирование проводили на стереоскопическом микроскопе МБС-10 в светопольном режиме и режиме косоугольного света. Структуры фотографировали с помощью цифровой камеры.

Для микроскопических исследований из образцов вырезали кубики со стороной 6–8 мм. Для удаления воздуха образцы проваривали в водной среде. Размягчение древесины осуществлялось в смеси глицерина и этанола (2 : 1) в течение недели при температуре  $45 \pm 2$  °С. Срезы, толщиной 10–60 мкм, получали на салазочном микротоме МС-2 [6]. Часть срезов окрашивали 0,5 %-ым водным генцианвиолетом и тионином (по Стоутсону). Временные глицериновые и водно-глицериновые микропрепараты изготавливали по общепринятой методике [7]. Микроскопирование проводили на исследовательском микроскопе Jenoval (Carl Zeiss), снабженном окуляр-микрометром.

В процессе сравнительно-анатомического исследования выявлен ряд микроструктурных отличий анализируемой топляковой древесины от нативной широколиственной ядровой древесины дуба черешчатого.

Радиальные трещины и  $S_1-S_2$  расслоения стенок волокнистых элементов практически отсутствуют. Изменения размеров и формы просветов трахеальных анатомических элементов встречаются редко.

Клеточные стенки всех анатомических элементов древесины имеют желто-бурую окраску, не отмываемую растворителями различной полярности (вода, этанол, ксилол) (рис. 1, 2). Интенсивность окраски стенок варьирует незначительно, слабо зависит от типа анатомического элемента. Нами замечено, что при увеличении продолжительности естественного морения древесины дуба цвет клеточных стенок и аморфных отложений в паренхимных клетках усиливается от темно-желтого до почти черного.

Внутренние полости практически всех пор контрастированы более темными оттенками основного цвета вследствие присутствия темноокрашенных деградированных внутренних слоев клеточной стенки и наличия в полости поры аморфных осадков (рис. 2, 5). Диаметры просветов пор увеличены, в особенности у паренхимных элементов. Внутренние поверхности клеточных стенок полостей большинства анатомических элементов древесины выстланы темноокрашенным слоем толщиной 0,25–5 мкм. При этом толщина стенок уменьшается с увеличением мощности выстилающего слоя. Данный слой, вероятнее всего, является продуктом деградации внутренних слоев клеточных стенок, что подтверждается наличием в слое деструктурированных пор или их элементов, присущих не разрушенной части клеточной стенки. Кроме этого в слое могут находиться продукты осаждения дубильных и прочих экстрактивных веществ как результат медленно протекающего процесса взаимодействия древесного вещества с компонентами пресных вод. Несомненно, определенный вклад в деструкцию топяковой древесины и образование продуктов деградации древесного вещества вносит микрофлора, нередко фиксируемая в полостях клеток. Бактерии и грибы, последствия деятельности которых особенно хорошо просматриваются в полостях паренхимных клеток, в процессе жизнедеятель-

ности и после отмирания способны оставлять в полостях клеток древесины различные аморфные скопления органических веществ вторичного биогенного происхождения (например производные хитина). Разнообразные темноокрашенные отложения аморфных веществ совместно с продуктами деградации внутренних слоев клеточной стенки наблюдаются в полостях почти всех паренхимных клеток (лучей и аксиальной паренхимы). Толстые слои – продукты деградации клеточных стенок, растрескиваясь, отделяются от неразрушенной части стенки, в дальнейшем смешиваясь с прочими осадками, закупоривают просвет трахеального элемента. Это явление фиксируется в полостях трахеид и члеников поздних сосудов (рис. 5).

Радиальный диаметр просветов ранних сосудов ( $285 \pm 60$  мкм) превышает тангенциальный ( $191 \pm 45$  мкм) на  $49 \pm 6$  %. Тилы в члениках ранних сосудов встречаются в виде мелких фрагментов. Это связано со значительными разрушениями их неодревесневших клеточных стенок. Вероятно, органическое содержимое тил (включая дубильные вещества) при высвобождении вступает в ряд физико-химических преобразований, что в значительной степени сказывается на процессе «морения» древесины дуба. Просветы поздних сосудов на поперечном срезе образуют «язычки», расширяющиеся к границе годичного кольца. Форма и поперечные размеры просветов члеников сосудов поздней древесины практически неизменны. Наиболее близки к нативному состоянию волокна либриформа. Их клеточные стенки визуально наиболее устойчивы к деструктирующим факторам. Полости либриформа выстланы очень тонким коричневым слоем толщиной менее 0,5 мкм (рис. 3). Высокая степень деструкции клеточной стенки встречается у аксиальной паренхимы и трахеид. Полости клеток лучевой и тяжелой паренхимы насыщены бесформенными структурами и каплевидными образованиями, имеющими различную интенсивность окраски. Часто полость паренхимной клетки, включая полости окружающих пор, полностью заполнена аморфным веществом (рис. 4, 6). Паренхимные



Рис. 1. Радиальный срез в зоне ранней древесины. По центру – ранние сосуды, окруженные волокнистыми трахеидами. Сверху и снизу располагаются лучи. Окраска клеточных стенок – желто-бурая. Объектив: С-Plan 12,5/0,3, ∞/0,17. Неокрашенный препарат



Рис. 2. Тангентальный срез в зоне поздней древесины. Видны контрастированные темные полости всех пор. Объектив: С-Plan 40/0,65, ∞/0,17. Неокрашенный препарат

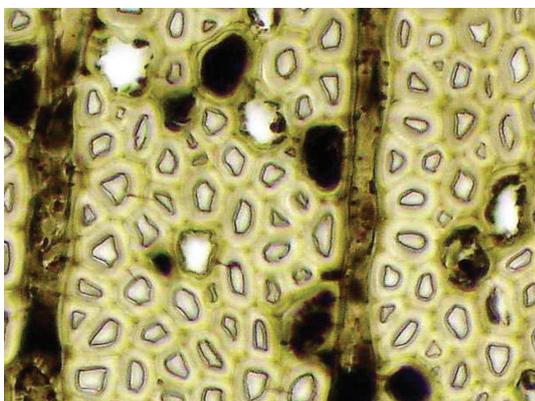


Рис. 3. Поперечный срез поздней зоны кольца. Внутренние поверхности клеточных стенок полостей волокон выстланы темноокрашенным слоем. Объектив: С-Plan 40/0,65, ∞/0,17. Неокрашенный препарат

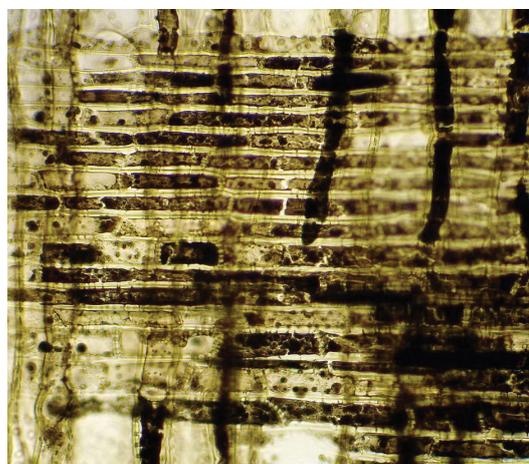


Рис. 4. Радиальный срез в зоне ранней древесины. В протопластах паренхимы наблюдаются отложения аморфных веществ. Объектив: С-Plan 12,5/0,3, ∞/0,17. Неокрашенный препарат

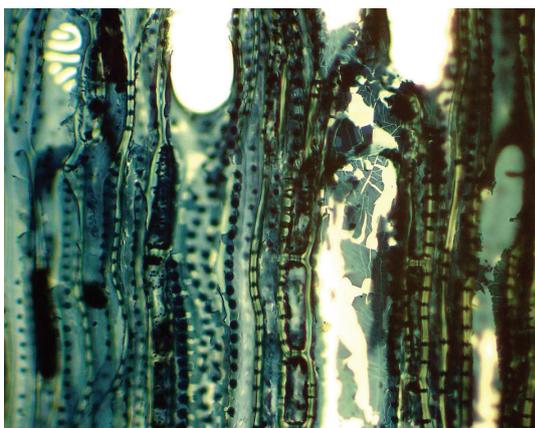


Рис. 5. Радиальный срез в зоне ранней древесины. Наблюдается растрескивание внутреннего выстилающего слоя в широкопросветном членике сосуда. Объектив: С-Plan 25/0,45, ∞/0,17. Окраска: водный тионин

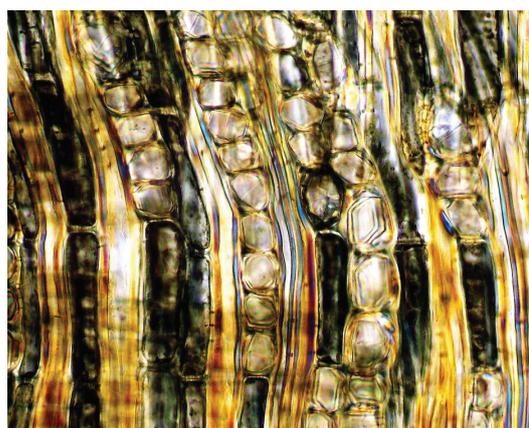


Рис. 6. Радиальный срез в зоне поздней древесины. Видны группы призматических кристаллов оксалата кальция в клетках аксиальной паренхимы. Объектив: С-Plan 25/0,45, ∞/0,17. Поляризационный режим

клетки, в особенности лучевые, нередко содержат крупные призматические кристаллы оксалата кальция (размером до 15 мкм), которые являются продуктом жизнедеятельности дуба. Прозрачные кристаллы контрастно и полихромно отличаются от просветов клеток при использовании метода поляризационного микроскопирования (рис. 6).

Таким образом, деформации клеточных стенок трахеальных анатомических элементов обнаруживаются редко. Межклеточные «щели» и микротрещины отсутствуют. Средняя пластинка (как наиболее лигнифицированный элемент древесины) неразрывна, прочно связывает смежные клеточные стенки. Полости всех паренхимных клеток содержат аморфные осадки различной структуры. Внутренняя поверхность полостей большинства клеток покрыта хрупким темноокрашенным слоем, вероятно, являющимся производным следующих основных процессов, протекающих в естественной среде топяковой древесины: локальной деструкции клеточной стенки (со стороны контактирующей со свободной водой), химического осаждения экстрактивных веществ (преимущественно флорафены), действия микрофлоры на древесину.

венно флорафены), действия микрофлоры на древесину.

### Библиографический список

1. Вихров, В.Е. Строение и физико-механические свойства ранней и поздней древесины дуба / В.Е. Вихров // Тр. института леса АН СССР, 1953. – Т. IX. – С. 29–37.
2. Туманян, С.А. Сравнительно-анатомическое исследование древесины представителей рода *Quercus* L. / С.А. Туманян // Тр. института леса АН СССР, 1953. – Т. IX – С. 39–69.
3. Яценко-Хмелевский, А.А. Анатомическое строение древесины основных лесообразующих пород СССР. Дуб – *Quercus* L. / А.А. Яценко-Хмелевский, К.И. Кобак. – Л.: Наука, 1978. – С. 15–31.
4. Атлас древесины и волокон для бумаги: под ред. Е.С. Чавчавадзе. – М.: Ключ, 1992. – 336 с.
5. Аксенов, П.А. Сравнительно-анатомическое исследование древесины дуба, применяемой в виноделии / П.А. Аксенов, В.В. Коровин // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – № 3 – М.: МГУЛ, 2010. – С. 5–15.
6. Барыкина, Р.П. Справочник по ботанической микротехнике. Основы и методы / Р.П. Барыкина и др. – М.: МГУ, 2004. – 312 с.
7. Яценко-Хмелевский, А.А. Основы и методы анатомического исследования древесины / А.А. Яценко-Хмелевский. – М. – Л.: Изд. АН СССР, 1954. – 335 с.

## РЕГУЛИРОВАНИЕ РОСТА, РАЗВИТИЯ И ПРОДУКТИВНОСТИ РАСТЕНИЙ ОЛИГОХИТАЗАНОМ В СОСТАВЕ ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНЫХ НАНОЧИПОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

Н.Л. ВОРОПАЕВА, ГНУ ВНИИ раница Россельхозакадемии,  
А.З. ИБРАЛИУ, Албанский сельскохозяйственный университет, Албания,  
О.Л. ФИГОВСКИЙ, Нанотех Индастрис Инк., США,  
Н. КАДИАСИ, Албанский сельскохозяйственный университет, Албания,  
В.П. ВАРЛАМОВ, ГНУ ВНИИ раница Россельхозакадемии,  
В.В. КАРПАЧЕВ, Центр «Биоинженерия» РАН, Россия

*bionanotex\_l@mail.ru*

*Светлой памяти проф. Игоря Николаевича Рубана посвящается*

Как известно, кукуруза (вид *Zea mays* L.) – одна из основных культур современного мирового земледелия, которая, обладая высокой урожайностью, широко применяется в различных сферах человеческой деятельности [1, 2]. В продовольственных целях в странах мира используется около 20 % зерна

кукурузы, в технических – 15–20 % и примерно две трети идет на корм. В зерне кукурузы содержатся углеводы (65–70 %), белки (9–12 %), жиры (4–8 %), минеральные соли, витамины и другие важные компоненты, лежащие в основе пищевой ценности этой культуры. Из зерна получают муку, крупу, хлопья,

консервы (сахарная кукуруза), крахмал, этиловый спирт, декстрин, пиво, глюкозу, сахар, патоку, сиропы, мед, масло, витамин Е, аскорбиновую, глутаминовую кислоты и некоторые другие вещества. Пестицидные столбики применяют в медицине. Из стеблей, листьев и початков вырабатывают бумагу, линолеум, вискозу, активированный уголь, искусственную пробку, пластмассу, анестезирующие средства и др. Кроме того, зерно кукурузы является прекрасным кормом для животноводства. В 1 кг зерна содержится 1,34 кормовой единицы и 78 г перевариваемого протеина, что делает кукурузу ценным компонентом комбикормов. Однако протеин зерна кукурузы беден незаменимыми аминокислотами (лизинном и триптофаном) и богат малоценным в кормовом отношении белком зеином. Силос на основе кукурузы имеет хорошую перевариваемость и обладает диетическими свойствами. 100 кг силоса, приготовленного из кукурузы в фазе молочно-восковой спелости, содержат около 21 кормовой единицы и до 1800 г перевариваемого протеина. Кукурузу используют на зеленый корм, который богат каротином. В корм идут и остающиеся после уборки на зерно сухие листья, стебли и стержни початков кукурузы. В 100 кг кукурузной соломы содержится 37 кормовых единиц, а в 100 кг размолотых стержней – 35 кормовых единиц. Как пропашная культура кукуруза – хороший предшественник в севообороте, способствует освобождению полей от сорняков, почти не имеет общих с зерновыми культурами вредителей и болезней. При уборке на зерно она – хороший предшественник зерновых культур, а при возделывании на зеленый корм – прекрасная парозанимающая культура. Кукуруза получила большое распространение в поукосных, пожнивных и повторных посевах. Используют ее и как кулисное растение.

С целью предотвращения поражения проростков кукурузы различными болезнями и вредителями (плесневыми грибами, корневыми и стеблевыми гнилями и др. – всего известно на сегодняшний день более 100 различных болезней на этой культуре) семена кукурузы обрабатывают различными протравителями комплексного действия: фунгицидами

(витавакс 200 (2 кг/т), витавакс 200 ФФ (2,5–3,0 л/т), максим 025 (1 л/т), премис (1,5 л/т); инсектицидами: промет 400, 40 % м.с. (25 л/т) или гаучо 70 % с.п. (5 кг/т) и другими препаратами системного действия [3–5]). При этом часто используют один из важных приемов подготовки семян к посеву, который называется инкрустирование – частичное покрытие поверхности семян различными пленкообразователями [6, 23]. Этот метод обработки заключается в том, что на поверхность семян наносят водные растворы полимерных пленкообразователей (поливиниловый спирт, натриевая соль карбоксиметилцеллюлозы и др.), в который, кроме протравителей, вводятся различные физиологически активные вещества, необходимые для активизации ростовых процессов кукурузы. Например, для обработки семян этой культуры используют состав (на 1 т семян): ПВС (поливиниловый спирт) в количестве 0,5–1 кг, биологически активные вещества, пестициды согласно нормам, рекомендуемым в соответствии с инструкциями по их применению [7–9]. Введение в гидрофильную пленку микроэлементов питания растений (цинк, марганец, молибден и др.) способствует повышению полевой всхожести семян кукурузы. В полевых условиях пленкообразующие протравители, предохраняя семена от поражения возбудителями болезней и вредителями, позволяют их высевать в более ранние сроки (на 5–10 дней).

В настоящее время в условиях надвигающегося экологического кризиса и резко меняющегося климата становятся актуальными подходы, связанные с повышением адаптации семян и растений различных культур к неблагоприятным факторам окружающей среды. При этом в агропромышленном комплексе используются современные экологически безопасные технологии, в том числе нанотехнологии [12–12, 24]. Альтернативой химическим препаратам выступают новые агротехнические и технологические приемы, специализированные севообороты, устойчивые к патогенам и вредителям данного региона новые выведенные сорта, оптимальные схемы посадки, биометод, микробиологические средства, фиторегуляторы роста и развития растений для

усиления естественных защитных реакций, биологически активные вещества природного происхождения и их производные, индуцирующие устойчивость растений к болезням и вредителям [13–15, 25].

Нами разрабатывается экологически безопасная нанотехнология для предпосевной обработки семян кукурузы с использованием физиологически активных полифункциональных многокомпонентных наночипов различного состава на основе биопестицидов – производных полисахаридов (хитина, целлюлозы) и природных минералов с применением нанотехнологических подходов при их создании, когда семя рассматривается как нанообъект, препараты готовятся в виде наночипов, а способ их нанесения осуществляется путем нанотехнологии [16, 26–28].

Получение наночипов, нанесение на поверхность семян и оценка их эффективности проведены согласно патенту USA [29]. Закладка лабораторных и полевых опытов, наблюдения, учеты, анализы выполнены по общепринятым для НИР международным стандартам, методикам и ГОСТам [17–21].

Наночипы различного состава, представляющие собой сформированные на наносорбенте на основе пористого модифицированного минерала наноструктурированные полифункциональные системы, с помощью производных полисахаридов – физиологически активного вещества аминополисахарида–хитозана (элиситора) и производных целлюлозы при определенных соотношениях компонентов и их концентрациях с включением в некоторые из них производственных фунгицидов и инсектицидов с резко сниженными нормами расхода. Наночипы либо с помощью полимерного связующего прикрепляются к поверхности семян, либо в виде раствора затекают, встраиваясь в нанопоры кожуры семени [22, 29].

Для выполнения данного эксперимента были использованы в качестве исходного посевного материала семена линии кукурузы В73, выведенные в Албанском Аграрном университете (UBT). В ходе эксперимента семена, обработанные наночипами различного состава, высевались на опытных участках

сельскохозяйственного университета г. Тираны (EDE Valias).

Наносистемы для предпосевной обработки готовили путем последовательного смешения исходных компонентов в различных концентрациях и соотношениях в воде по соответствующим рецептурам, исходя из объемов, принятых в технологии предпосевного протравливания семян. Семена обрабатывали путем нанесения на их поверхность разработанных наночипов различного состава, подсушивали, контролировали полноту нанесения, учитывая при этом отсутствие осыпаемости вводимых в полифункциональные комплексные наносистемы компонентов, и тарировали.

Полевые и лабораторные опыты по изучению эффективности нанотехнологии предпосевной обработки семян с применением наночипов различного состава проводили согласно общепринятым методикам. Опыты закладывали в четырех повторениях, исходя из общей схемы:

- семена необработанные (контроль);
- семена, обработанные используемым в производстве протравителем (эталон);
- семена, обработанные отдельными компонентами наносистем, входящих в состав наночипов;
- семена, обработанные различными компонентами при варьировании их концентрации и соотношений в физиологически активных полифункциональных многокомпонентных системах;
- семена, обработанные различными компонентами при варьировании их концентрации и соотношений в физиологически активных полифункциональных системах совместно с принятым в производстве протравителем со сниженной нормой расхода.

Опыты заложены по общепринятой методике по Доспехову [20–21] в четырех повторениях на фоне общепринятой в Албании технологии возделывания культуры кукурузы. Во всех полевых опытах проведены фенологические, фитосанитарные наблюдения и учеты согласно общепринятым методикам и разработанным рекомендациям. Для защиты посевов кукурузы от сорняков они были обработаны в период вегетации гербицидами.

За период вегетации растений кукурузы в опыте были проведены следующие учеты и наблюдения: комплекс фенологических наблюдений – начало появления всходов – в зависимости от состава систем, используемых для предпосевной обработки семян, полные всходы, густота стояния растений (по всходам и перед уборкой), появление первого настоящего листа и 6–7 листьев, начало и полная бутонизация, начало и массовое цветение, накопление сырой и сухой массы, биометрические показатели растений (высота растений, высота ветвления, диаметр стебля, число початков на растении, число семян в початке, масса 1000 семян, вес семян растения, восковая спелость и урожайность. Учеты и наблюдения проводились по Методике государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур (1971, 1985 гг.). Учеты поражения болезнями посевов кукурузы были также проведены согласно общепринятым методикам. Заселенность и повреждаемость посевов вредителями была определена по методике ВИЗР. Кроме того, проведен структурный анализ урожая кукурузы по снопам, собранным с каждой делянки двух несмежных повторений – с 4 площадок. Изучен биохимический состав растительных образцов и проведены анализы растений и семян (после уборки урожая) на содержание основных компонентов, определяющих качество продукции во всех вариантах опыта. Влажность семян, чистота семян, энергия прорастания, всхожесть, масличность, жирнокислотный состав масла, определены по соответствующим ГОСТАМ и методикам поделяночно. Математическая обработка полученной информации проведена методом вариационной статистики по Б.А. Доспехову (1979, 1987 гг.) и с помощью современных компьютерных программ [20–21].

По результатам полевых испытаний в Албании было выявлено в отдельных вариантах опытов (с нанообработкой):

– стабильное улучшение всех показателей роста и развития растений кукурузы по сравнению с контролем (максимальное увеличение высоты растений на 18,3 см, расстояния до первого початка – на 5,0 см, длины

початка – на 0,6 см, массы початка – на 41,0 г, массы 1000 семян – на 5 г);

– увеличение урожайности культуры кукурузы до 11,3 ц/га в зависимости от состава наночипов по сравнению с контролем (семена ничем не обработаны) согласно математической обработке данных на двух уровнях достоверности/значимости 0,05 % и 0.01 % (при минимальной установленной разнице (DMV) при 0,01, производительность равнялась 11,3 центнерам / га с 99 % точностью).

Таким образом, полученные результаты испытаний позволяют сделать заключение о высокой эффективности разрабатываемой нанотехнологии предпосевной обработки семян, в частности, кукурузы, что открывает большие перспективы для применения этой технологии на различных культурах.

### Библиографический список

1. Вавилов, П.П. Растениеводство / П.П. Вавилов, В.В. Гриценко, В.С. Кузнецов, и др. – М.: Агропромиздат, 1986.
2. Ресурсосберегающая технология выращивания кукурузы. – Днепропетровск: Институт зернового хозяйства УААН, 2002.
3. Список пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории Российской Федерации. – М., 2010. – 916 с.
4. Алексейчук, Г.Н. Современная технология предпосевной обработки семян и ее биологические основы / Г.Н. Алексейчук, Н.А. Ламан, Ж.Н. Калацкая // Наука и инновации. – 2006. – Т. 43. – № 9. – С. 37–41.
5. Предпосевная обработка семян: выбор протравителя или препараты на выбор? <http://www.agroliga.ru/index.php/ru/public/17-my-mysql-database-does-not-support-utf-8-do-i...> – 14.09.2010.
6. Воропаева, Н.Л. Водорастворимые полимер-полимерные смеси / Н.Л. Воропаева, С.Ш. Рашидова. – Ташкент: АН РУз, ФАН, 2006. – 187 с.
7. Инструкция по протравливанию семян водорастворимыми пленкообразующими полимерами на заводах. – М., 1985. – 45 с.
8. Краткая инструкция 9-4-84 по протравливанию семян водорастворимыми пленкообразующими препаратами на заводах. – М., 1984. – 19 с.
9. Гигиеническая классификация пестицидов по степени опасности. МР 3 2001/26. М.2001.
10. Нанотехнологии: библиографический указатель / сост. Л. З. Кононцева. – Ставрополь: НБ СтГАУ, 2010. – 21 с. – (90 источников, 2004–2009 гг). <http://www.zerno-a.com/?p=2025>
11. Федоренко, В.Ф. Нанотехнологии и наноматериалы в агропромышленном комплексе: моногр.;

- МСХ РФ / В.Ф. Федоренко. – М.: Росинформагротех, 2008. – 148 с.
12. Рубан, И.Н. Использование информационных нанобиотехнологий для анализа, прогноза и улучшения (стабилизации) экологической ситуации: в кн. Современное состояние лесного хозяйства и озеленения в Республике Казахстан: проблемы, пути их решения и перспективы / И.Н. Рубан, Н.Л. Воропаева, О.В. Лебедев и др. – Алма-Аты, 2007. – С. 265–268.
  13. Тарчевский, В.П. Сигнальные системы клеток растений / В.П. Тарчевский. – М.: Наука, 2001. – 348 с.
  14. Озерковская, О.Л. Проблемы специфического иммунитета / О.Л. Озерковская // Физиология растений, 2002. – Т. 49. – С. 148–154.
  15. Тютюрев, Л. Научные основы индуцированной болезнестойкости растений / Л. Тютюрев. – СПб., 2002. – 328 с.
  16. Рубан, И.Н. К проблеме использования нанотехнологий в предпосевной подготовке семян. В кн. Селекция сортов риса, устойчивых к абиотическим и биотическим стрессам, для стран умеренного климата и Центральной Азии / И.Н. Рубан, Н.Л. Воропаева, М.Д. Шарипов. – Краснодар: ВНИИ риса, 2008. – С. 165–171.
  17. Руге, У. Практикум по физиологии роста и развития растений / У. Руге. – М.: Иностранная литература, 1955. – 192 с.
  18. ГОСТ 12038-84. Определение всхожести. Семена сельскохозяйственных культур.
  19. Семена сельскохозяйственных культур. Сортовые и посевные качества. – М., 2010. – 424 с.
  20. Доспехов, Б.А. Методика полевого опыта / Б.А. Доспехов. – М.: Колос, 1983. – 420 с.
  21. Доспехов, Б.А. Планирование полевого опыта и статистическая обработка его данных / Б.А. Доспехов. – М.: Колос, 1972. – 207с.
  22. Нижегородов, А. Вермикулит и вермикулитовые технологии / А. Нижегородов. – Иркутск: Бизнес-Строй, 2008. – 500 с.
  23. Rashidova S. Sh., Ruban I. N., Voropaeva N. L. Biologically active agricultural polymers (mechanism of action on plants). The polymeric materials encyclopedia.– USA, 1996, V. 2. p. 615–628.
  24. Ruban, N. Voropaeva, M.Sharipov, Magarshak Yu.B. Modern risks of the antropogenic influence on living spieces: nano-level fluctuations. In the book Silicon Versus Carbon. Fundamental nanoproceses, nanobiotechnology and risks assessment. Shpringer, 2009. p.353–377.
  25. I Heng Yina, Xiaoming Zhao, Yuguang Du. Oligochitosan: A plant diseases vaccine–A review. - Carbohydrate Polymers. Volume 82, Issue 1, 2 August 2010, p. 1–8.
  26. I Ruban, M.Sharipov, N.Voropaeva. Native nanoobjects and technology increasing their stability to enviroment unfavourable factors. In the book XIV Intern. Workshop on Bioencapsulation, Lausanna, Switzerland, 2006, p. 435–437.
  27. I.N. Ruban, N.L.Voropaeva, M.D. Sharipov. Natural nanoobject, nanostructure, nanoproperty, nanotechnology. On the book Nanobiotechnologies in agriculture. Moscow, Russia.: Timiryazevskaya Academy.– 2008. С. 135–145.
  28. I.Ruban, N. Voropaeva, M.Sharipov, O. Figovsky. The risks connected with use of polymeric nanostructures in technologies of seeds treatment before sowing. Journal «Scientific Israel-Technological Advantages», 2010, V.12, № 1, p. 99–119.
  29. I. Ruban, N. Voropaeva et.al. Biologically active multifunctional nanochips and method application thereof for production of high-quality seed. Патент US 2011/0000411 A1, 2011.

## ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ НА СВОЙСТВА ПОЧВ

Г.Н. ФЕДОТОВ, *ст. научн. сотр. Института экологического почвоведения МГУ  
им. М.В. Ломоносова, д-р биол. наук,*

Т.Ф. РУДОМЕТКИНА, *ст. научн. сотр. Института экологического почвоведения МГУ  
им. М.В. Ломоносова, канд. хим. наук,*

В.С. ШАЛАЕВ, *проф. директор ИСИЛ МГУЛ, д-р техн. наук*

*gennadiy.fedotov@gmail.com*

**П**очва представляет собой систему, функционирующую как единое целое, и ее целостность обеспечивают почвенные гели, покрывающие и связывающие почвенные частицы между собой [1–5]. Фактически почвенные гели являются системообразующим

компонентом почвы, превращая смесь частиц в единую систему (система – целостность, возникающая за счет функционального взаимодействия входящих в нее частей).

Изучение почвенных гелей позволило сделать вывод о том, что их основой является

гумусовый студень (студни – структурированные (твердообразные) системы, состоящие из высокомолекулярных веществ и низкомолекулярных жидкостей), армированный минеральными частицами [6, 7]. Дальнейшие исследования показали, что гумусовая матрица имеет многоуровневую структурную организацию и основным элементом почвенных гелей является фрактальный кластер из супермолекул гумусовых веществ (ГВ) [8].

При изучении почв было показано, что введение небольших количеств поверхностно-активных веществ (ПАВ) приводит к значительному увеличению водоустойчивости почвенной структуры [9]. При этом изменяются образующие фрактальные кластеры супермолекулы, а в гумусовой матрице наблюдается возникновение микро- и наноструктурной сегрегации. Меняется также фракционный состав ГВ, выделяемых из почв [10].

Все эти данные позволили предположить, что молекулы ПАВ встраиваются в супермолекулы ГВ, изменяя их размер и свойства, что приводит к перестройке фрактальных кластеров и самих гелей. Однако подобная гипотеза нуждалась в экспериментальной проверке.

Целью работы являлось изучение механизма влияния поверхностно-активных веществ на свойства почв.

В качестве объектов исследования использовали образцы, отобранные из гумусово-аккумулятивного горизонта дерново-подзолистой почвы из окрестностей поймы р. Яхромы, в которые вводили различные количества ПАВ: олеата натрия, Tween 20 (полиоксиэтилен (20) сорбитан монолаурат), Tween 60 (полиоксиэтилен (20) сорбитан моностеарат).

Для определения гидролитической кислотности и каталазной активности образцы почв с добавками ПАВ готовили следующим образом: к 50 г дерново-подзолистой почвы, просеянной через сито с размером ячеек 1 мм и помещенной в полиэтиленовый стакан емкостью 100 мл, добавляли пипеткой 10,0 мл дистиллированной воды и хорошо перемешивали. Стакан с почвой накрывали часовым стеклом и помещали в эксикатор, на дно которого предварительно наливали немного дистиллирован-

ной воды. В эксикатор помещали стаканчик с толуолом для предотвращения развития микрофлоры. Эксикатор герметично закрывали крышкой и оставляли на сутки до набухания почвы. На следующий день вводили пипеткой 10,5 мл свежеприготовленного раствора ПАВ необходимой концентрации, хорошо перемешивали и снова помещали в тот же эксикатор на сутки. После этого стакан с почвой переносили в сушильный шкаф и высушивали почву при 40°C. Полученную почву растирали в фарфоровой ступке и использовали для проведения исследований. Всегда использовали только свежеприготовленную почву, модифицированную ПАВ.

Контрольную пробу дерново-подзолистой почвы, не содержащую ПАВ, обрабатывали водой в тех же условиях, что и готовили модифицированную почву.

Для приготовления агрегатов с ПАВ для определения набухания в каждый агрегат ввели по 10 мкл дистиллированной воды из микродозатора. Увлажненные агрегаты в чашке Петри помещали в эксикатор с дистиллированной водой. В эксикатор помещали стаканчик с толуолом для предотвращения развития микрофлоры. Эксикатор герметично закрывали крышкой и оставляли на сутки. В набухшие агрегаты вводили микродозатором по 10 мкл растворов ПАВ необходимой концентрации и снова помещали в эксикатор на срок не менее 1 суток. Затем агрегаты помещали в сушильный шкаф и удаляли воду при 40°C.

Гидролитическую кислотность и каталазную активность определяли по общепринятым методикам [11, 12].

Исследование набухания агрегатов проводили на 40 агрегатах размером 4,0–4,5 мм.

При исследовании набухания агрегатов каждый из них был сфотографирован с использованием телелупы БТП-1332А в видимом свете. Изображения сфотографированных агрегатов были распечатаны на стандартной бумаге для принтеров, и каждый агрегат вырезан ножницами по контуру изображения. Вырезанные изображения агрегатов были взвешены на аналитических весах с точностью до 4-го десятичного знака.

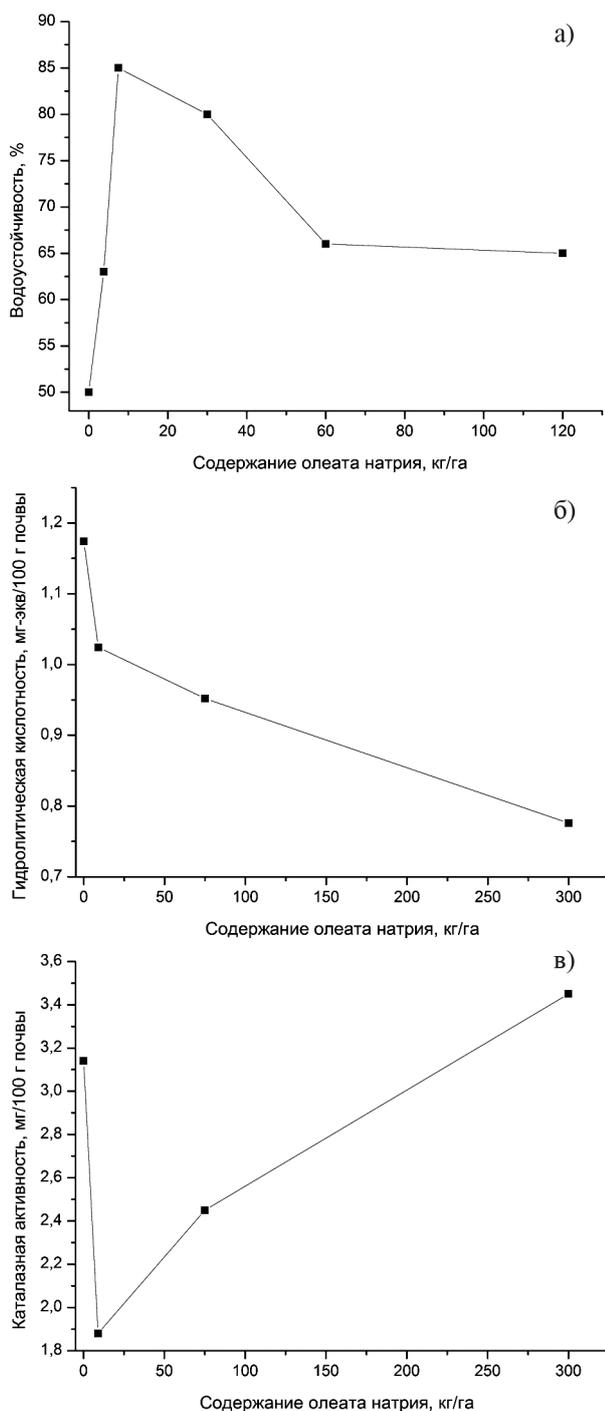


Рис. 1. Влияние олеата натрия на водоустойчивость почвенной структуры (а), гидролитическую кислотность (б) и каталазную активность дерново-подзолистой почвы

Сфотографированные агрегаты на подложке из фильтровальной бумаги были помещены в чашку Петри с увлажненным песком для набухания в герметично закрываемой кювете, на дне которой было налито небольшое количество воды. Время набухания – одни

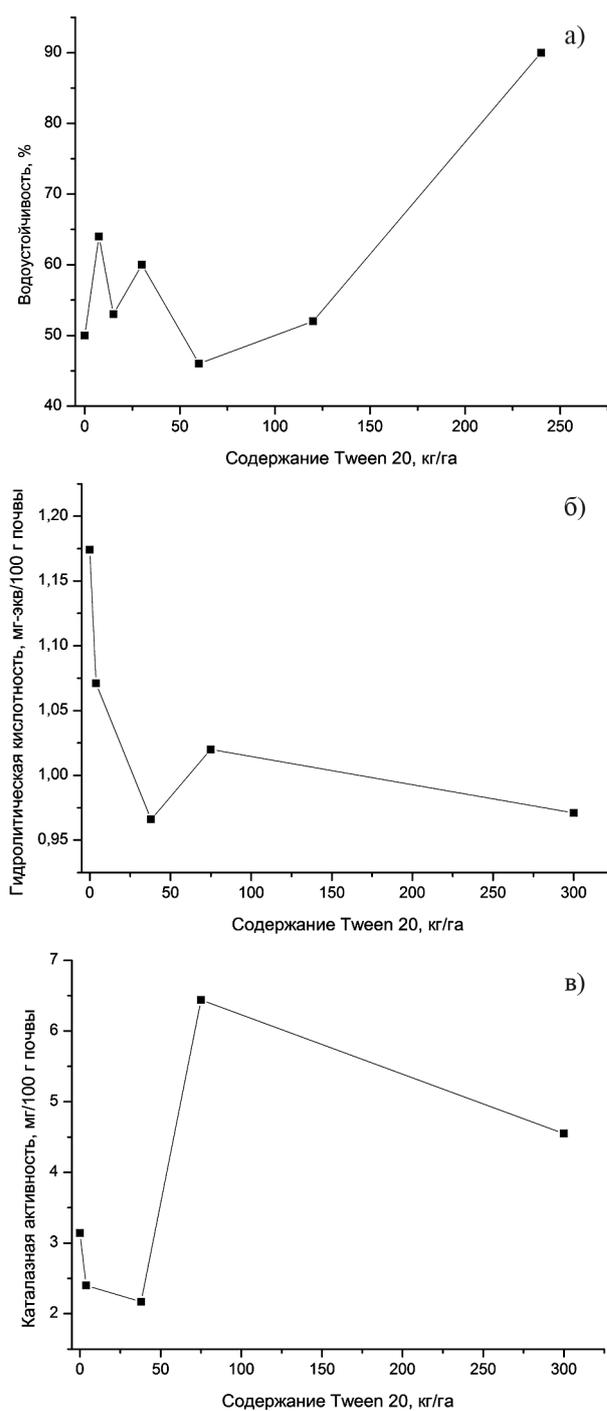


Рис. 2. Влияние Tween 20 на водоустойчивость почвенной структуры (а), гидролитическую кислотность (б) и каталазную активность дерново-подзолистой почвы

сутки. После этого каждый агрегат был вновь сфотографирован. Изображения набухших агрегатов были также распечатаны, вырезаны и взвешены. С использованием массы вырезанных набухших и исходных агрегатов был рассчитан средний коэффициент набухания.

При определении водоустойчивости почвенной структуры за основу нами был выбран метод, предложенный П.И. Андриановым в модификации Н.А. Качинского [13], в котором учитывалось количество распавшихся в стоячей воде почвенных агрегатов за определенные интервалы времени. Однако в методику были внесены изменения, связанные с изучением распада в стоячей воде предварительно увлажненных почвенных агрегатов.

В решетку, состоящую из 64 отверстий диаметром 6 мм, каждое из которых снизу было поделено пополам проволокой диаметром 1 мм, помещали почвенные агрегаты размером 4,5–5 мм. В них предварительно до помещения в решетку вносили по 10 мкл воды и выдерживали во влажной атмосфере в течение нескольких суток для завершения процесса набухания почвенных гелей.

При изучении влияния модификаторов на водопрочность почвенных агрегатов в них после завершения процесса набухания почвенных гелей вносили в каждый агрегат по 10 мкл растворов ПАВ и оставляли еще на сутки во влажной атмосфере, предполагая, что при такой постановке эксперимента имитируются почвенные условия – модификаторы взаимодействуют с набухшими почвенными гелями.

Для проведения исследований по определению водоустойчивости решетку с образцами помещали в УЗ-ванну. Воду сначала наливали в небольшом количестве так, чтобы она не доставала до решетки, затем постепенно поднимали уровень воды так, чтобы он был приблизительно на 0,5–1 см выше агрегатов. Как только агрегаты насыщались водой, включали УЗ и секундомер. Каждую минуту подсчитывали число распавшихся агрегатов. Агрегат считали распавшимся, если он полностью провалился в отверстие решетки. Время наблюдения составляло 10 мин.

Распад каждого из 64 агрегатов в воде происходит за разное время, поэтому для установления их средней водоустойчивости в расчет вводится коэффициент, который характеризует водоустойчивость агрегатов в процентах в зависимости от времени их разруше-

ния. Для агрегатов, разрушившихся в течение первой минуты, он равен 5 %, 2-й – 15 %, 3-й – 25 %, 4-й – 35 %, 5-й – 45 %, 6-й – 55 %, 7-й – 65 %, 8-й – 75 %, 9-й – 85 %, 10-й – 95 %. Не разрушившихся в течение 10 мин. – 100 %.

Водоустойчивость структуры оценивали по показателю водоустойчивости (К), %

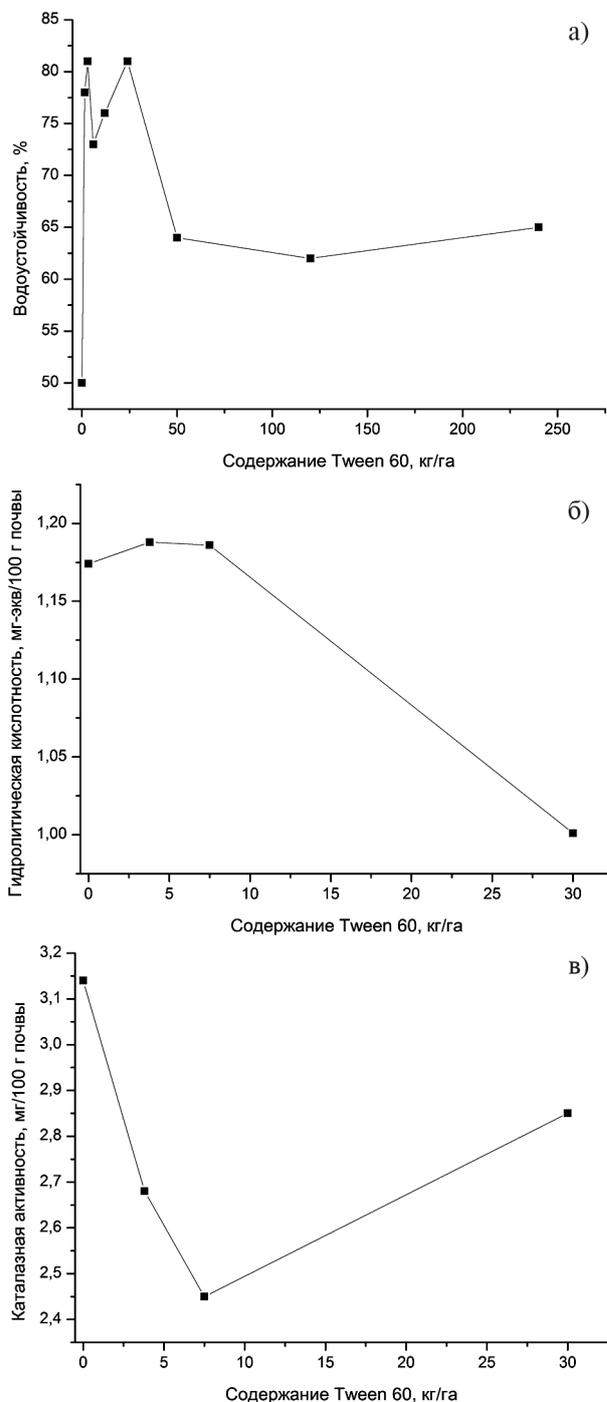


Рис. 3. Влияние Tween 60 на водоустойчивость почвенной структуры (а), гидролитическую кислотность (б) и каталазную активность дерново-подзолистой почвы

$$K = \{(ak_1) + (bk_2) + \dots + (nk_n)\}/A,$$

где  $a, b, \dots$  – количество агрегатов, распавшихся в  $m$ -ю минуту;

$n$  – количество нераспавшихся за 10 мин. агрегатов;

$k_1, k_2, \dots, k_n$  – поправочный коэффициент;

$A$  – общее количество агрегатов, взятых для анализа.

Погрешность определения показателя водоустойчивости не превышала 10 %.

Изучение наноструктурной организации почвенных гелей проводили, выделяя гели обработкой дистиллированной водой воздушно-сухих образцов почв [7] до и после внесения в них модификаторов. Гелевые пленки, поднимающиеся на поверхности воды, помещали на атомно-гладкую поверхность слюды.

Исследование проводили при помощи растрового электронного микроскопа JEOL-6060A (фирмы JEOL, Япония) с вольфрамовым катодом. На образцы перед исследованием напыляли платину, используя установку JFC-1600 (фирмы JEOL, Япония).

Полученные результаты по влиянию добавок ПАВ на свойства почв представлены на графиках (рис. 1–3) и в таблице.

Прежде чем начать анализ полученных результатов, необходимо оценить пути влияния структурных изменений гумусовой матрицы на свойства почв, а также возможные изменения структурной организации гумусовой матрицы почвенных гелей при попадании в нее молекул ПАВ.

Гидролитическая кислотность обусловлена ионами водорода, более прочно свя-

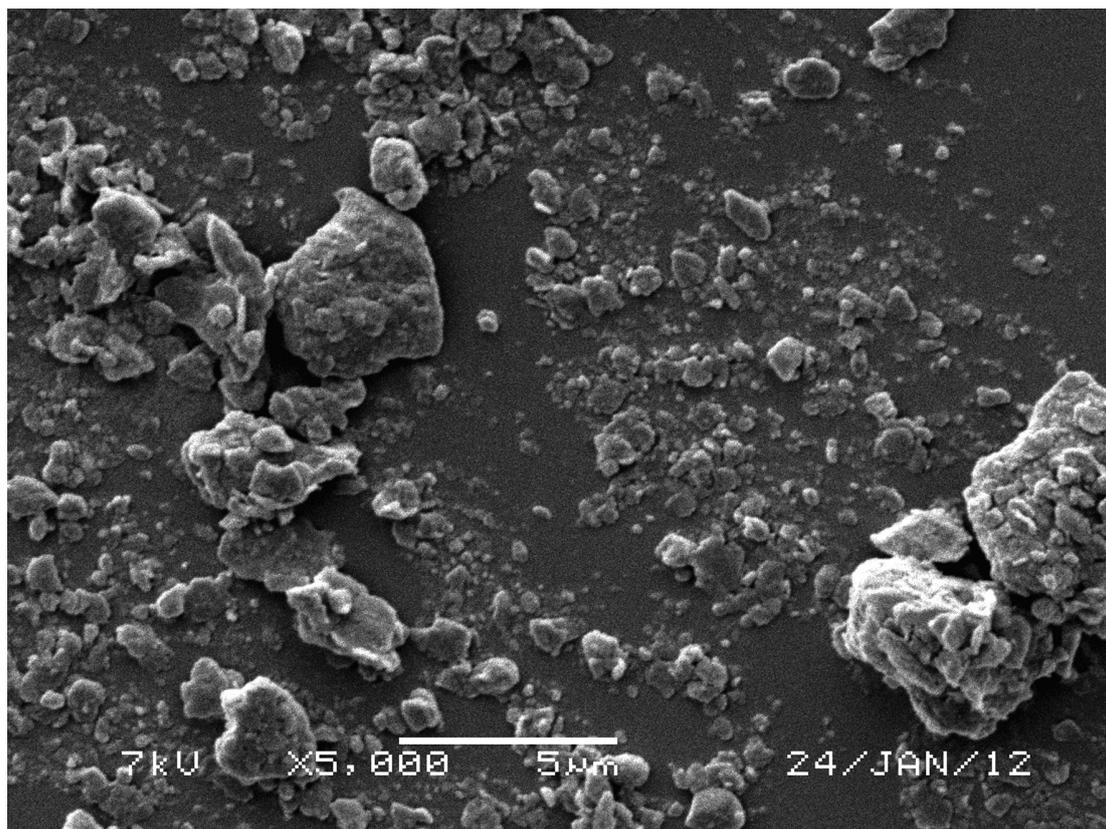
Т а б л и ц а

**Изменение коэффициента объемного набухания почвенных агрегатов ( $K_{об}$ ) при введении в дерново-подзолистую почву различных добавок**

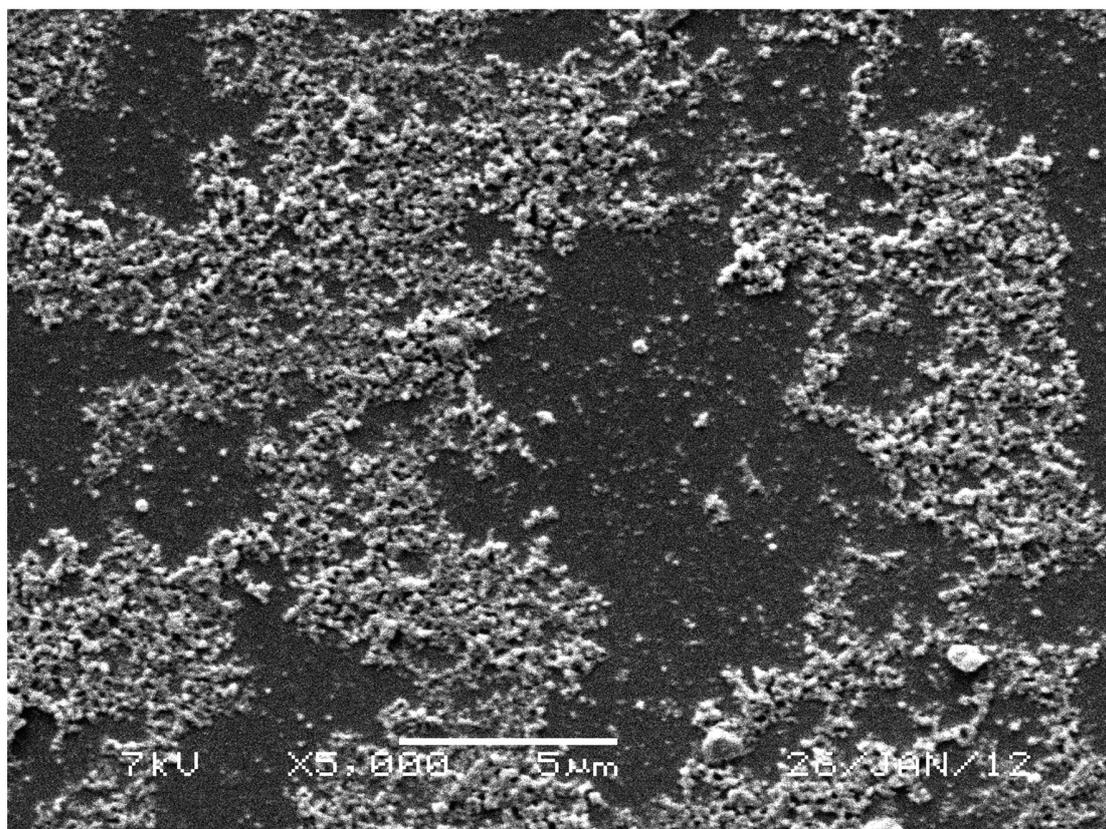
Добавки	Количество добавок, кг/га	$K_{об}$
Исх д. п. п	0	$1,357 \pm 0,002$
Tween 20	300	$1,320 \pm 0,004$
Tween 60	30	$1,556 \pm 0,002$
	300	$1,621 \pm 0,007$
Олеат натрия	9,4	$1,548 \pm 0,004$
	300	$1,530 \pm 0,005$
$Ca^{2+}$	9600	$1,389 \pm 0,003$

занными с коллоидной составляющей почв и вытесняемыми при взаимодействии с растворами гидролитически щелочных солей или щелочей. Ионы водорода в гумусовой матрице находятся в карбоксильных и фенольных группах. При введении ПАВ происходит уменьшение гидролитической кислотности, хотя характер изменения для каждого ПАВ свой. Взаимодействовать с кислотными группами гумусовой матрицы молекулы ПАВ не могут в силу своего химического строения. Следовательно, они вызывают изменения, которые приводят к уменьшению ионизации. Можно предложить два механизма, которые приводят к подобному результату. Один хорошо известен для полиэлектролитов [14] – при увеличении концентрации кислотных групп в единице объема степень их ионизации падает. Второй связан с влиянием активности воды на диссоциацию слабых электролитов – чем ниже активность воды, тем ниже степень их диссоциации. Это позволяет сделать вывод, что введение молекул ПАВ уменьшает активность воды во фрактальных кластерах из супермолекул ГВ и может приводить к структурным изменениям в гумусовой матрице, при которых часть кислотных групп сближается и начинает располагаться в меньшем объеме.

При добавлении большинства ПАВ набухание почвенных агрегатов возрастает (табл. 1). Можно предположить, что набухание почвенных гелей – гумусовой матрицы связано, в первую очередь, с повышением гидрофильности и перестройкой фрактальных кластеров из супермолекул ГВ – с увеличением их размеров. Механизм этого процесса основан на том, что в растворе вблизи гидрофильных участков поверхности супермолекул ГВ существуют ионные атмосферы, перекрывание которых термодинамически невыгодно. Поэтому они должны стремиться располагаться как можно дальше друг от друга. Гидрофобные же области супермолекул ГВ стремятся контактировать между собой, уменьшая свой контакт с водой и увеличивая тем самым трансляционную энтропию воды и системы в целом [15]. Это подтверждается данными по уменьшению фрактальной раз-



а)



б)

Рис. 4. Электронно-микроскопические фотографии почвенных гелей, выделенных из дерново-подзолистой почвы, модифицированной различными ПАВ: а. олеат натрия, 9,4 кг/га; б. Tween 20, 75 кг/га

мерности почв при их увлажнении, полученными методом малоуглового рассеяния нейтронов [16].

Каталаза в силу своего размера не может входить в супермолекулы ГВ и должна встраиваться во фрактальные кластеры из супермолекул ГВ. Причина снижения каталазной активности при введении в почву ПАВ может быть связана с тем, что при перестройках в гумусовой матрице часть экзогенных ферментов должна попадать в более плотные области. В результате может произойти искажение четвертичной структуры фермента, что приводит к его инактивации [12, 17].

Изменение водоустойчивости почвенной структуры под влиянием ПАВ является с прикладной точки зрения одним из самых интересных и важных моментов [9]. Имеющиеся сведения о структурной организации почвенных гелей [8] позволяют предположить, что их водоустойчивость, обуславливающая водоустойчивость почв, определяется взаимодействием между фрактальными кластерами из супермолекул ГВ в почвенных гелях. По-видимому, чем больше связей и они прочнее между фрактальными кластерами, тем более водоустойчива почвенная структура. В связи с тем, что супермолекулы ГВ во фрактальных кластерах имеют мозаичную – гидрофильно-гидрофобную поверхность, связи между этими кластерами в водной среде могут возникать только за счет взаимодействия гидрофобных областей. Как следствие, чем больше количество гидрофобных областей, по которым происходит взаимодействие между кластерами, тем выше водоустойчивость почвенной структуры. Следовательно, на повышение водоустойчивости должно влиять несколько факторов: степень взаимопроникновения фрактальных кластеров друг в друга, количество гидрофобных участков в единице объема кластера, по которым они могут взаимодействовать между собой, и средняя энергия возникающих связей.

После того, как мы выдвинули предположения о путях влияния ПАВ на различные свойства почв, имеет смысл рассмотреть направление изменения структуры гумусовой матрицы при вхождении в нее молекул ПАВ.

Как мы уже отмечали выше, при попадании молекул ПАВ в почвы происходит перестройка супермолекул ГВ [10]. В результате подобной перестройки возможно изменение соотношения между гидрофильными и гидрофобными областями супермолекул ГВ. Следствием этого может являться прохождение различных процессов изменения структуры:

1. Повышение гидрофобности супермолекул ГВ приведет к образованию прочных гидрофобных областей при высушивании почв и затруднению набухания супермолекул ГВ при их взаимодействии с водой.

2. Повышение гидрофильности супермолекул ГВ, как это ни парадоксально, может приводить к аналогичному результату. При высушивании почвы, по-видимому, возникают замкнутые гидрофильные области, которые и обеспечивают прочность сухих почв. Более высокая гидрофильность супермолекул ГВ может приводить к снижению выигрыша энергии при разворачивании фрактальных кластеров из супермолекул ГВ и замедлению этого процесса.

3. Как повышение гидрофильности супермолекул ГВ, так и повышение их гидрофобности могут приводить к качественному изменению проходящих процессов. От роста или снижения доли гидрофильных областей возможен переход к перестройке супермолекул ГВ с сегрегацией их на более гидрофильные и более гидрофобные области, которые на первом этапе могут входить в состав кластеров, но при превышении их доли начнут выделяться в виде отдельной фазы.

4. Следствием подобных структурных перестроек будет немонотонное от концентрации добавок ПАВ изменение почвенных свойств.

Необходимо отметить, что определение гидролитической кислотности и каталазной активности проводили в соответствии с методиками с использованием высушенных почвенных образцов, контактирующих с водой 30–60 мин. и не приходящих с ней в равновесное состояние. В то же время определение степени набухания почв и водоустойчивости почвенной структуры проводили на

образцах, практически пришедших в равновесное состояние с водой.

Следует также обратить внимание на еще одно важное обстоятельство. Казалось бы, лучшим методом определения начала сегрегации и степени прохождения этого процесса в гумусовой матрице почвенных гелей является электронно-микроскопическое исследование гелевых пленок, поднимающихся на поверхность воды при увлажнении воздушно-сухих почв. Однако это не соответствует действительности по ряду причин.

Во-первых, на поверхность воды поднимаются гели из разных областей почвенного образца, сильно отличающиеся друг от друга по степени микро- и наносегрегации. Поэтому делать выводы о свойствах всего почвенного образца не представляется возможным. В поднимающихся на поверхность воды гелевых пленках можно найти области гелей практически любой степени микро- и наносегрегации, и отличаются они по количеству разных областей. Поэтому попытка изучения этим методом влияния концентрации ПАВ на степень микро- и наносегрегации не приводит к успеху. Можно отличить только образцы гелей, которые кардинально отличаются друг от друга.

Во-вторых, изучая образец при помощи электронного микроскопа, мы можем наблюдать области, отличающиеся по характеру взаимодействия с электронным пучком. Прежде всего, при изучении органических образцов, к которым относятся и гелевые пленки на основе ГВ, речь идет о плотности упаковки органических молекул – плотности образца. При этом рассматривается два варианта, в которых могут существовать составляющие органической матрицы почвенных гелей – плотное (гидрофобное) и менее плотное (гидрофильное). В этих условиях принимается существование только одного перехода: *гидрофильное* → *гидрофобное*.

Однако подобный подход с позиции «да–нет» вызывает сомнения, так как нет никаких доказательств об отсутствии промежуточных по степени гидрофобности стабильных состояний, различимых при помощи РЭМ:

*гидрофильное* → *промежуточное 1* → *промежуточное 2* → .....и т.д. → → *гидрофобное*.

В этих условиях получение необходимой количественной информации при помощи РЭМ о свойствах почв и их изменениях при введении в почвы модификаторов при наличии в органической составляющей почвенной гелевой матрицы одного структурного перехода трудозатратно и малопродуктивно, а при наличии нескольких переходов неосуществимо в принципе.

Все это необходимо учитывать при анализе результатов.

Рассмотрим данные, полученные при изучении систем с олеатом натрия (рис. 1, таблица).

Из них следует, что:

- кластеры из супермолекул ГВ сильно набухают – их гидрофильность растет скачкообразно при попадании в почву олеата натрия, а затем практически не изменяется;

- прочность связи между кластерами сначала возрастает, а затем с ростом количества олеата натрия начинает убывать;

- количество ионизируемых групп с ростом содержания олеата натрия в непришедших в равновесие с водой образцах почв убывает;

- при изменении фрактальных кластеров из супермолекул ГВ каталаза в не пришедших в равновесие с водой образцах почв сначала попадает в стесненные условия, а затем с ростом содержания олеата натрия стесненность уменьшается;

- для всех почвенных свойств существуют области экстремумов, и они для разных свойств совпадают.

В полученных результатах можно отметить, что одновременно наблюдается и рост гидрофильности (по набуханию), и снижение гидролитической кислотности и каталазной активности при попадании ПАВ в почву. Подобное может происходить только при росте не гидрофобности, а гидрофильности при введении ПАВ в почвы. Как было отмечено выше, при высушивании почв возникают замкнутые гидрофильные области, в которые входит каталаза и карбоксильные группы.

В результате возникновения кластеров большего размера и пористости при введении в почвы олеата натрия усиливается взаимопроникновение кластеров друг в друга и возрастает количество связей между ними. Как следствие, наблюдается рост водоустойчивости.

Однако по достижении некоторого предела по количеству ПАВ рост гидрофильности фрактальных кластеров приводит к уменьшению прочности связей между ними, и водоустойчивость начинает снижаться. Одновременно рост гидрофильности приводит к снижению активности воды в кластерах и уменьшению степени ионизации кислотных групп, а также к увеличению доступности каталазы.

Однако наличие экстремума на всех кривых «свойство почвы – содержание олеата натрия» можно объяснить не только постепенным ростом гидрофильности супермолекул ГВ при росте содержания олеата натрия, но и началом сегрегации. Этот процесс будет усиливать описанные выше процессы, так как выделение гидрофобных нанофаз (кластеров из гидрофобных супермолекул ГВ) должно приводить к сильной гидрофилизации оставшихся кластеров из супермолекул ГВ.

Системы с Tween 20 ведут себя несколько иначе (рис. 2, таблица). Введение ПАВ в почву приводит даже к некоторому уменьшению набухания, т.е. к уменьшению гидрофильности. В результате степень проникновения фрактальных кластеров друг в друга должна уменьшаться, но при этом может увеличиваться количество и прочность связей. Как следствие, наблюдается сложная зависимость водоустойчивости от содержания ПАВ.

Гидролитическая кислотность на начальном этапе для Tween 20 уменьшается даже быстрее, чем для олеата натрия, что, по-видимому, связано с их входением в гидрофильные области. Из-за меньшей гидрофильности возникающих образований и меньшего снижения активности воды во фрактальных кластерах наблюдается почти в 2 раза меньшее снижение гидролитической кислотности.

Повышение гидрофобности позволяет входить каталазе в выделившиеся при высушивании почв гидрофильные области, только при малых содержаниях Tween 20. При росте концентрации ПАВ происходит не просто увеличение доступности каталазы, а ее выход из этих областей с резким возрастанием каталазной активности. Подобное позволяет предположить начало в этой области содержания Tween 20 сильных по сравнению с олеатом натрия сегрегационных процессов, хорошо видимых на электронно-микроскопических изображениях (рис. 4).

Прохождение сегрегационных процессов приводит к росту водоустойчивости почвенной структуры, по-видимому, основанном на скреплении гумусовой матрицы почвенных гелей выделившимися гидрофобными фазами.

Введение в почву Tween 60 (рис. 3, табл. 1) приводит к росту набухания, увеличению при малом содержании ПАВ (до 7,5 кг/га) водоустойчивости, уменьшению каталазной активности, а гидролитическая кислотность остается практически неизменной.

Обращает на себя внимание, что каталазная активность в сравнении с олеатом натрия снижается заметно меньше, что совместно с данными о постоянстве гидролитической кислотности свидетельствует о доступности гидрофильных областей.

Однако дальнейший рост гидрофильности при увеличении содержания Tween 60 ведет к реализации тех же процессов в системе, которые характерны для почвенных образцов с олеатом натрия.

Суммируя все полученные результаты, можно сделать предварительный вывод о том, что максимальная водоустойчивость почвенной структуры будет характерна для модификаторов, вызывающих повышение гидрофильности супермолекул ГВ и набухание фрактальных кластеров из них, но не приводящих к сегрегации.

### Библиографический список

1. Винокуров, М.А. Содержание и состав органоминеральных гелей в почвах / М.А. Винокуров // Почвоведение, 1942. – № 3–4. – С. 73–88.

2. Ганжара, Н.Ф. Почвоведение / Н.Ф. Ганжара. – М.: Агроконсалт, 2001. – 392 с.
3. Почвоведение: учеб. для ун-тов. Ч. 1. Почва и почвообразование: под ред. В.А. Ковды. – М.: Высш. шк., 1988. – 400 с.
4. Тюлин, А.Ф. Органо-минеральные коллоиды в почве, их генезис и значение для корневого питания высших растений / А.Ф. Тюлин. – М.: АН СССР, 1958. – 52 с.
5. Чухров, Ф.В. Коллоиды в земной коре / Ф.В. Чухров. – М.: Изд. АН СССР, 1955. – 671 с.
6. Федотов, Г.Н. Коллоидные структуры в почвах / Г.Н. Федотов, Ю.Д. Третьяков, Г.В. Добровольский, В.И. Путляев и др. // Доклады Академии наук РФ, 2005. – Т. 404. – № 3. – С. 352–354.
7. Федотов, Г.Н. Уточнение представлений о строении почвенных гелей / Г.Н. Федотов, Ю.Д. Третьяков, В.И. Путляев, Е.И. Пахомов и др. // Доклады Академии наук РФ, 2006. – Т. 411. – № 2. – С. 203–205.
8. Федотов, Г.Н. Строение органического вещества почвенных гелей / Г.Н. Федотов, Г.В. Добровольский // Доклады Академии наук РФ, 2012. – Т. 442. – № 4. – С. 570–573.
9. Федотов, Г.Н. Наноструктурная организация почвенных гелей и водоустойчивость почвенной структуры / Г.Н. Федотов, В.С. Шалаев, Т.Ф. Рудометкина // Вестник МГУЛ – Лесной вестник, 2011. – № 5. – С. 34–40.
10. Федотов, Г.Н. Влияние наноструктурной организации почвенных гелей на фракционный состав гумусовых веществ в почве / Г.Н. Федотов, Т.Ф. Рудометкина // Доклады АН РФ, 2011. – Т. 439. – № 1. – С. 64–67.
11. Практикум по агрохимии: под ред. В.Г. Минеева. – М.: МГУ, 1989. – 304 с.
12. Хазиев Ф.Х. Ферментативная активность почв. Методическое пособие / Ф.Х. Хазиев. – М.: Наука, 1976. – 180 с.
13. Вадюнина, А.Ф. Методы исследования физических свойств почв и грунтов / А.Ф. Вадюнина, З.А. Корчагина. – М.: Высш. шк., 1973. – 400 с.
14. Семчиков, Ю.Д. Высокомолекулярные соединения: учеб. для вузов / Ю.Д. Семчиков. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 368 с.
15. Клеман, М. Основы физики частично упорядоченных сред / М. Клеман, О.Д. Лаврентович. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 680 с.
16. Федотов, Г.Н. Фрактальные коллоидные структуры в почвах различной зональности / Г.Н. Федотов, Ю.Д. Третьяков, В.К. Иванов, А.И. Куклин и др. // Доклады АН РФ. 2005. – Т. 405. – № 3. – С. 351–354.
17. Тульская, Е.М. Иммобилизация каталазы и специфика каталазной активности / Е.М. Тульская, Д.Г. Звягинцев // Почвоведение, 1980. – № 1. – С. 90–96.

## ОБРАЗОВАНИЕ ДИССИПАТИВНЫХ СТРУКТУР ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ВОЗДУШНО-СУХИХ ПОЧВ С ВОДОЙ

Г.Н. ФЕДОТОВ, *ст. научн. сотр. Института экологического почвоведения МГУ*

*им. М.В. Ломоносова, д-р биол. наук,*

В.С. ШАЛАЕВ, *проф. директор ИСИЛ МГУЛ, д-р техн. наук,*

А.И. ПОЗДНЯКОВ, *проф. ф-та почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова, д-р биол. наук,*

А.Е. ПУЗАНОВА, *студентка ф-та почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова*

*gennadiy.fedotov@gmail.com, shalaev@mgul.ac.ru*

**В** настоящее время общепризнано, что почвенные коллоиды в виде гелей покрывают и связывают почвенные частицы между собой, обеспечивая существование почвы как системы с определенным набором свойств [9]. Причем почвенные гели рассматривают как армированный различными частицами студень гумуса [10]. При взаимодействии с водой армированный гумусовый студень ведет себя подобно многим полимерам – набухает, вбирая в себя воду и увеличиваясь в объеме, при высушивании происходит его усадка.

Одними из важнейших свойств, характеризующих подобные системы, являются

структурно-механические свойства [3, 13], позволяющие получить информацию о происходящих в системах структурных перестройках. Подобные методы уже использовали в отечественном почвоведении для углубления представлений о почвах [1, 2, 4].

Особый интерес представляет изучение процессов структурных перестроек в почвах при взаимодействии воздушно-сухих почв с водой. Работы в данном направлении велись при помощи конического пластометра Ребиндера [12]. Исследовали процессы, происходящие после увлажнения воздушно-сухих почв до содержания влаги, соответс-

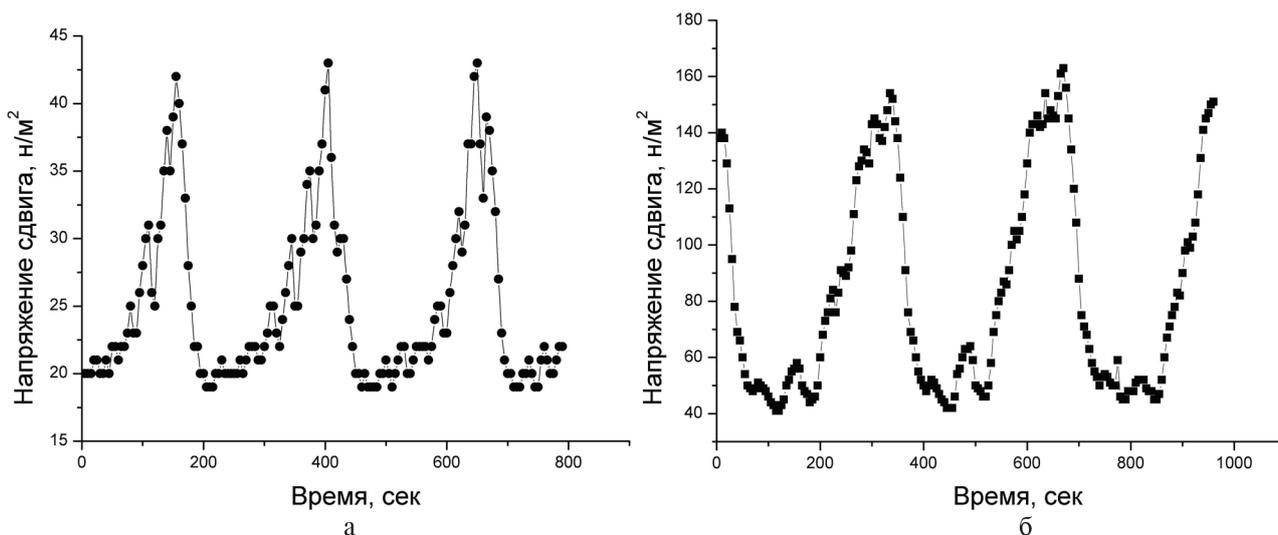


Рис. 1. Колебательное изменение напряжения сдвига в серой лесной почве: а. Влажность почвы 37,2 %, скорость сдвига  $0,68 \text{ с}^{-1}$ , время фиксации колебаний – 57 мин.; б. Влажность почвы 37,7 %, скорость сдвига  $0,3 \text{ с}^{-1}$ , время фиксации колебаний – 153 мин

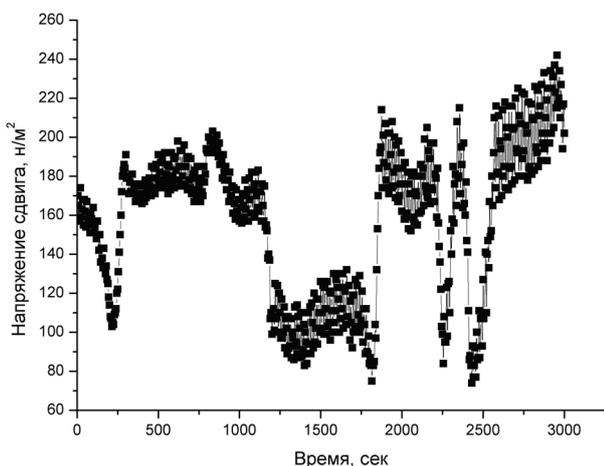


Рис. 2. Колебательное изменение напряжения сдвига в серой лесной почве: влажность почвы 37,4 %, скорость сдвига  $2,55 \text{ с}^{-1}$ , время фиксации колебаний – 153 мин

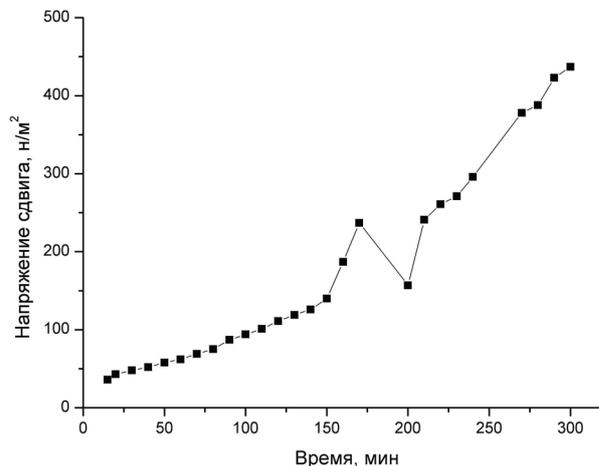


Рис. 3. Изменение напряжения сдвига в серой лесной почве: влажность почвы 36,8 %, скорость сдвига  $0,68 \text{ с}^{-1}$ , время фиксации колебаний – 153 мин

твующего упруго-хрупкому, пластичному и вязко-пластичному состояниям. Было установлено, что после добавления воды в воздушно-сухие почвы прочность почвенной структуры растёт в течение нескольких дней [12]. Сначала напряжение сдвига меняется достаточно быстро, а затем скорость изменения постепенно снижается. Это позволило сделать вывод о том, что прохождение процесса набухания почвенных гелей и переход воздушно-сухих почв в новое стационарное состояние происходит в течение достаточно длительного времени.

Однако метод изучения структурно-механических свойств при помощи пластометра Ребиндера, во-первых, не обладает высокой чувствительностью и точностью, а, во-вторых, не позволяет получать информацию в непрерывном режиме.

Это не позволило исследовать структурные перестройки в почвах при их взаимодействии с водой на наиболее важном начальном этапе.

Целью настоящего исследования являлось изучение изменения воздушно-сухих почв при их взаимодействии с водой при ис-

пользовании высокочувствительной ротационной вискозиметрии [14].

В работе использовали образцы серой лесной почвы Владимирского ополья.

При приготовлении образцов для исследования 20–25 г воздушно-сухой почвы смешивали в течение 2–3 мин. с водой, количество которой обеспечивало получение почвы с определенной влажностью. После этого почву загружали в ячейку вискозиметра Брукфилда HBDV-II+PRO (компания Brookfield, США). В работе использовали адаптер для малых образцов SSA и шпиндель SC4-27 SSA.

Время от добавления воды в почву до начала процесса измерения (время, в течение которого исследование изменений структурно-механических свойств не проводили) составляло 15 мин. Изучали изменение напряжения сдвига в системе от времени взаимодействия почвы с водой при заданной скорости сдвига. Скорости сдвига изменяли в интервале  $0,17\text{--}3,4\text{ с}^{-1}$ .

После завершения эксперимента проводили определение влажности почвы при помощи «Анализатора влажности MB25».

В результате было установлено, что в течение первых 4–5 часов во всех случаях наблюдается увеличение напряжения сдвига от времени, прошедшего после начала взаимодействия воздушно-сухих почв с водой.

Подобный результат был вполне ожидаемым, так как соответствовал ранее полученным данным [12]. Однако при проведении исследований выяснилось, что в определенных для каждой из почв интервалах влажностей в течение определенного интервала времени нарастание напряжения сдвига происходит не монотонно, а в колебательном режиме.

Было обнаружено, что появление колебаний напряжения сдвига происходит не всегда, а зависит от влажности почвы и скорости вращения шпинделя. В одних случаях возникали периодические колебания напряжения сдвига, причем амплитуда и частота колебаний постепенно изменялись (рис. 1 а, б, таблица), в других случаях периодичность отсутствовала (рис. 2, таблица).

Для удобства анализа результаты сведены в таблицу (таблица).

Из полученных данных следует, что колебания напряжения сдвига начинались через 50–180 мин. после добавления воды в почву, а прекращались через 190–410 мин. Причем они возникали в интервале влажностей почвы 36,8–37,9 % и скоростей сдвига  $0,3\text{--}3,4\text{ с}^{-1}$ .

В некоторых случаях на краю области существования колебаний наблюдался излом на кривой изменения напряжения сдвига от времени, прошедшего после начала взаимодействия воздушно-сухих почв с водой (рис. 3).

Следует отметить, что при поглощении воздушно-сухой почвой нескольких десятых долей процента паров воды колебания исчезали, а удаление долей процента воды из воздушно-сухой почвы при  $40^\circ\text{ С}$  приводило к смещению области существования колебаний в направлении больших скоростей сдвига.

Существование колебаний напряжений сдвига оказалось весьма неожиданным, так как колебательных процессов в почвенных системах никогда не наблюдали. Было очевидно, что в данном неравновесном процессе мы столкнулись с образованием диссипативных структур [6–8], которые, как хорошо известно, могут возникать в системах только при реализации в них положительных и отрицательных обратных связей. Самым ярким и наиболее изученным примером колебательной реакции среди химических процессов является реакция Белоусова-Жаботинского [5].

Все это делало необходимым проводить анализ и искать объяснения обнаруженному явлению с позиций синергетики, то есть следовало попытаться найти существующие в данной системе положительные и отрицательные обратные связи.

Ранее было показано, что структурным элементом почвенных гелей, определяющих свойства почв, является фрактальный кластер из нанометровых супермолекул гумусовых веществ (ГВ) [11]. При высушивании почвы происходит уплотнение почвенных гелей из-за удаления из них воды. Можно предположить, что это уплотнение гелей является результатом перестройки как самих органических наночастиц (супермолекул ГВ), так и образующихся из них фрактальных кластеров в направлении сегрегации гидрофильных и гидрофобных областей.

**Изменение напряжения сдвига при взаимодействии  
воздушно-сухой серой лесной почвы с водой**

Скорость сдвига, 1/с	Влажность почвы, %	Время начала колебаний, мин	Время окончания колебаний, мин	Время определения параметров колебаний, мин	Амплитуда колебаний, н/м <sup>2</sup> /период колебаний, сек
0,68	37,2	50	250	57	24 / 270
0,68	37,2	50	250	131	74 / 435
0,68	37,2	50	250	193	101 / 470
0,68	37,2	50	250	249	120 / 350
0,3	37,7	150	220	153	126 / 325
0,3	37,7	150	220	213	НП*
2,55	37,4	150	340	159	НП*
2,55	37,4	150	340	195	НП*
2,55	37,4	150	340	228	88 / 320
2,55	37,4	150	340	252	НП*
2,55	37,4	150	340	335	НП*
0,68	36,8	180	190	185	70 / 700
0,68	37,9	140	280	145	26 / 120
0,68	37,9	140	280	210	60 / 210
0,68	37,9	140	280	272	100 / 300
0,68	37,4	180	410	188	43 / 405
0,68	37,4	180	410	239	80 / 410
0,68	37,4	180	410	287	110 / 460
0,68	37,4	180	410	360	НП*
0,68	37,4	180	410	403	НП*
3,4	36,9	180	205	185	НП*
0,68	37,9			Колебания отсутствуют	
0,17	37,9			Колебания отсутствуют	
0,238	37,4			Колебания отсутствуют	
0,408	36,7			Колебания отсутствуют	

\* НП – отсутствие периодичности у колебаний.

При добавлении воды в эти системы, по-видимому, происходит ее проникновение в гидрофильные области гелей с постепенным отделением части фрактальных кластеров или блоков из них.

В результате в воде начинают накапливаться частицы, имеющие мозаичную гидрофильно-гидрофобную поверхность, которые должны стремиться провзаимодействовать друг с другом за счет гидрофобных связей. Гидрофобное взаимодействие – притяжение между неполярными частицами в воде (или других полярных растворителях), которое обусловлено термодинамической невыгодностью контакта воды с неполярными веществами. Гидрофобное взаимодействие проявляется только в присутствии полярных растворителей. Сильное притяжение между полярными молекулами приводит к оттал-

киванию ими гидрофобных частиц и агрегации последних. Гидрофобное взаимодействие участвует в формировании третичной структуры белков и обеспечивает молекулярное распознавание в некоторых супрамолекулярных комплексах «гость–хозяин». Оно проявляется также при образовании мицелл и др. структур в растворах поверхностно-активных веществ.

Как следствие возникают пространственно разветвленные структуры, прочность которых возрастает с увеличением их размера, что является ярко выраженной положительной обратной связью в данной системе – чем крупнее образование, тем быстрее оно растет.

Однако фрактальные кластеры из супермолекул ГВ, возникшие (изменившиеся) при высушивании почв, не могут обладать равновесной структурой для своего нахож-

дения в воде и должны стремиться перестроиться в более гидрофильные образования.

Для любого процесса структурной перестройки необходимо преодолевать некоторый активационный барьер. Наличие флуктуации энергии для преодоления такого барьера в локальной точке рассматриваемой системы должно приводить к перестройке отдельного кластера (или нескольких отдельных кластеров).

Увеличение гидрофильности образующихся после перестройки кластеров автоматически уменьшает их стремление к взаимодействию между собой по гидрофобным участкам и приводит к росту энергии их взаимодействия с водой, а, следовательно, к выделению энергии при перестройке кластеров в локальной точке системы и росту в этой точке температуры.

В свою очередь, рост температуры способствует преодолению активационного барьера для соседних фрактальных кластеров и катализирует прохождение волны разрушения структуры, что, по-видимому, и представляет собой отрицательную обратную связь в системе.

С этих позиций основными условиями возникновения колебаний напряжения сдвига в системе являются:

– переход в раствор в достаточном количестве неперестроившихся, неустойчивых к существованию в растворе, более гидрофобных фрактальных кластеров;

– определенная концентрация этих кластеров в растворе, характеризующая вязкостью (напряжением сдвига) системы;

– наличие определенного соотношения между энергией активации процесса перестройки фрактальных кластеров и тепловым эффектом реакции при данных температуре системы и скорости вращения шпинделя.

Невыполнение первого условия полностью исключает возможность возникновения в системе колебаний. Подобное происходит при поглощении воздушно-сухой почвой незначительного количества паров воды. По-видимому, в этом случае из-за проходящей перестройки фрактальных кластеров еще в почве доля перешедших в раствор неперестроившихся кластеров уменьшается настолько, что выделения тепла при пере-

стройке оставшихся кластеров в возникшей в растворе структуре недостаточно для запуска автокаталитического процесса их перестройки, приводящего к разрушению структуры.

В случае удаления несколько большего количества воды из воздушно-сухой почвы переход неперестроившихся кластеров происходит, но энергия активации их перестройки слишком высока и процесс удается запустить только при дополнительной «закачке энергии» в систему – значительном увеличении скорости сдвига.

Таким образом, незначительные изменения в исходном состоянии воздушно-сухой почвы оказывают большое влияние на возможность и условия возникновения колебаний напряжения сдвига в эксперименте.

Предложенный механизм для описания наблюдаемых при взаимодействии воздушно-сухих почв с водой колебательных процессов позволяет объяснить полученные результаты, а также понять, в каких условиях могут возникать колебания напряжения сдвига. Однако необходимо отметить, что в большой степени при разработке механизма мы опирались на данные о наноструктурной организации почв и логику поведения подобных систем, а экспериментального подтверждения всех аспектов предлагаемого механизма пока не получено.

### Библиографический список

1. Аbruкова, Л.П. Кинетика процессов тиксотропного структурообразования в почвенных суспензиях / Л.П. Аbruкова // Почвоведение, 1970. – № 3. – С. 104–114.
2. Аbruкова, Л.П. Тиксотропные свойства темно-серых лесных почв / Л.П. Аbruкова // Почвоведение, 1972. – № 8. – С. 74–82.
3. Бибик, Е.Е. Реология дисперсных систем / Е.Е. Бибик. – Л.: ЛГУ, 1981. – 172 с.
4. Горбунов, Н.И. Реологические свойства и минералогический состав слитых почв / Н.И. Горбунов, Л.П. Аbruкова // Почвоведение, 1974. – № 8. – С. 74–85.
5. Жаботинский, А.М. Концентрационные автоколебания / А.М. Жаботинский. – М.: Наука, 1974. – 180 с.
6. Исаев, В.В. Синергетика для биологов: вводный курс / В.В. Исаев. – М.: Наука, 2005. – 158 с.
7. Николис, Г. Познание сложного / Г. Николис, И. Пригожин. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 344 с.
8. Пригожин, И. Порядок из хаоса. Новый диалог человека с природой / И. Пригожин, И. Стенгерс. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 312 с.

9. Тюлин, А.Ф. Органо-минеральные коллоиды в почве, их генезис и значение для корневого питания высших растений / А.Ф. Тюлин. – М.: АН СССР, 1958. – 52 с.
10. Федотов, Г.Н. Гелевые структуры в почвах. Дисс.... д-ра биол. наук / Г.Н. Федотов. – М., 2006. – 356 с.
11. Федотов, Г.Н. Строение органического вещества почвенных гелей / Г.Н. Федотов, Г.В. Добровольский // Доклады АН РФ. 2012. – Т. 442. – № 4.
12. Федотов, Г.Н. Гелевые структуры и структурно-механические свойства почв / Г.Н. Федотов, Ю.Д. Третьяков, Е.И. Пахомов // Доклады АН РФ, 2007. – Т. 412. – № 1. – С. 73–75.
13. Фролов, Ю.Г. Структурообразование в дисперсных системах. Реологические свойства структур / Ю.Г. Фролов. – М.: МХТИ, 1980. – 63 с.
14. Шрам, Г. Основы практической реологии и реометрии / Г. Шрам. – М.: КолосС, 2003. – 312 с.

## МИНЕРАЛЬНЫЕ НАНОЧАСТИЦЫ В ГУМУСОВОЙ МАТРИЦЕ ПОЧВЕННЫХ ГЕЛЕЙ

Г.Н. ФЕДОТОВ, *ст. научн. сотр. Института экологического почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова, д-р биол. наук,*  
В.С. ШАЛАЕВ, *проф. директор ИСИЛ МГУЛ, д-р техн. наук*

*gennadiy.fedotov@gmail.com*

В течение длительного времени основной существующих представлений о почвах являлась физическая модель. В соответствии с ней почвы рассматриваются как системы, состоящие из твердой, жидкой и газообразной фаз (понятие фазы в данном контексте имеет смысл агрегатного состояния) [1, 2]. С позиций физической модели твердая фаза почвы состоит из частиц разного размера, а вещество может находиться либо в ионно-молекулярном состоянии в почвенном растворе, либо в состоянии микро- и макрочастиц.

Коллоидная составляющая почв с этих позиций представлена гелями, образованными коллоидными частицами, которые покрывают и связывают почвенные микро- и макрочастицы между собой [3–5]. Считается, что ОВ либо адсорбировано на неорганических частицах, либо входит в состав почв в виде отдельных частиц, либо в небольших количествах находится в почвенном растворе.

С этих позиций вполне естественной выглядела задача разделения частиц, составляющих почвы, на фракции и поиска эмпирических закономерностей между содержанием различных фракций в почвах и свойствами почв [6–17]. При этом полагали, что основная сложность на пути решения подобной задачи связана с агрегацией частиц, и если найти способ разделения агрегатов до моночастиц, то все проблемы снимутся.

В подобном подходе прослеживается часто встречающаяся в науке попытка понять свойства целого путем изучения его частей. Однако подобные попытки могут быть успешными только в том случае, если мы имеем дело не с системой, а со смесью, в которой связи между составляющими ее частями практически полностью отсутствуют (система – целостность, обусловленная взаимодействием входящих в нее частей, и свойства системы складываются как из свойств составляющих ее частей, так и определяются характером взаимодействия между этими частями – связями между ними. Поэтому, познав свойства частей системы, невозможно понять и предсказать ее поведение).

Почва не является смесью из составляющих ее компонентов, это система, функционирующая как единое целое, и целостность этой системы и ее функционирование обеспечиваются почвенными гелями, которые покрывают и связывают почвенные частицы между собой. Фактически почвенные гели являются системообразующим компонентом почв, превращая смесь частиц в единую систему – почву.

Исследования почвенных гелей позволили сделать предварительный вывод о том, что основой почвенных гелей является гумусовый студень, армированный минеральными частицами [18–20] (студни – структурированные (твердообразные) системы, состоящие из

высокомолекулярных веществ и низкомолекулярных жидкостей).

При изучении изменения свойств сухих почв при их взаимодействии с водой было показано, что все эти изменения хорошо объясняются с позиций взаимодействия с водой почвенных гелей – армированных гумусовых студней, которые ведут себя подобно многим полимерам – набухают, вбирая в себя воду и увеличиваясь в объеме, а при высушивании происходит их усадка. Различные воздействия на почву изменяют состояние армированного гумусового студня, что приводит к изменению свойств почв. Следует отметить, что при этом подходе гумусовый студень воспринимали как некую однородную субстанцию – органическую матрицу, вмещающую минеральные частицы [18, 21] (Выше мы уже отмечали, что в настоящее время общепризнано – почвенные коллоиды в виде гелей покрывают и связывают почвенные частицы между собой, обеспечивая существование почвы как системы с определенным набором свойств. Основная масса неорганических почвенных частиц не изменяется при взаимодействии с водой, поэтому логично объяснять изменения свойств почв при их взаимодействии с водой изменением почвенных гелей. Исключением являются набухающие минералы, но они входят в состав почвенных гелей).

Проведение дальнейших исследований показало, что гумусовая матрица почвенных гелей неоднородна, в ней часто происходят процессы микро- и наносегрегации с выделением более гидрофобной фазы [22, 23]. Было установлено, что основой почвенных гелей являются фрактальные кластеры из супермолекул гумусовых веществ [24–27].

Основное внимание при проведении исследований было сосредоточено на органической матрице почвенных гелей, а минеральная составляющая, которой в почвенных гелях содержится более 90 %, воспринималась в качестве частиц микронных размеров, армирующих гумусовую матрицу и не оказывающих значимого влияния на ее микро- и наноструктурную организацию.

Однако подобный подход требовал экспериментального подтверждения, так как

было показано, что при взаимодействии гумусовых веществ с глинистыми минералами из них выщелачиваются катионы, и это приводит к возникновению сегрегации в гумусовых пленках [22].

Существует два варианта взаимодействия неорганических наночастиц с гумусовой матрицей:

1. Взаимодействие неорганических наночастиц между собой с образованием неорганических кластеров, дающих с органическими кластерами мозаичную органо-минеральную матрицу;

2. Нахождение неорганической составляющей внутри гумусовой матрицы.

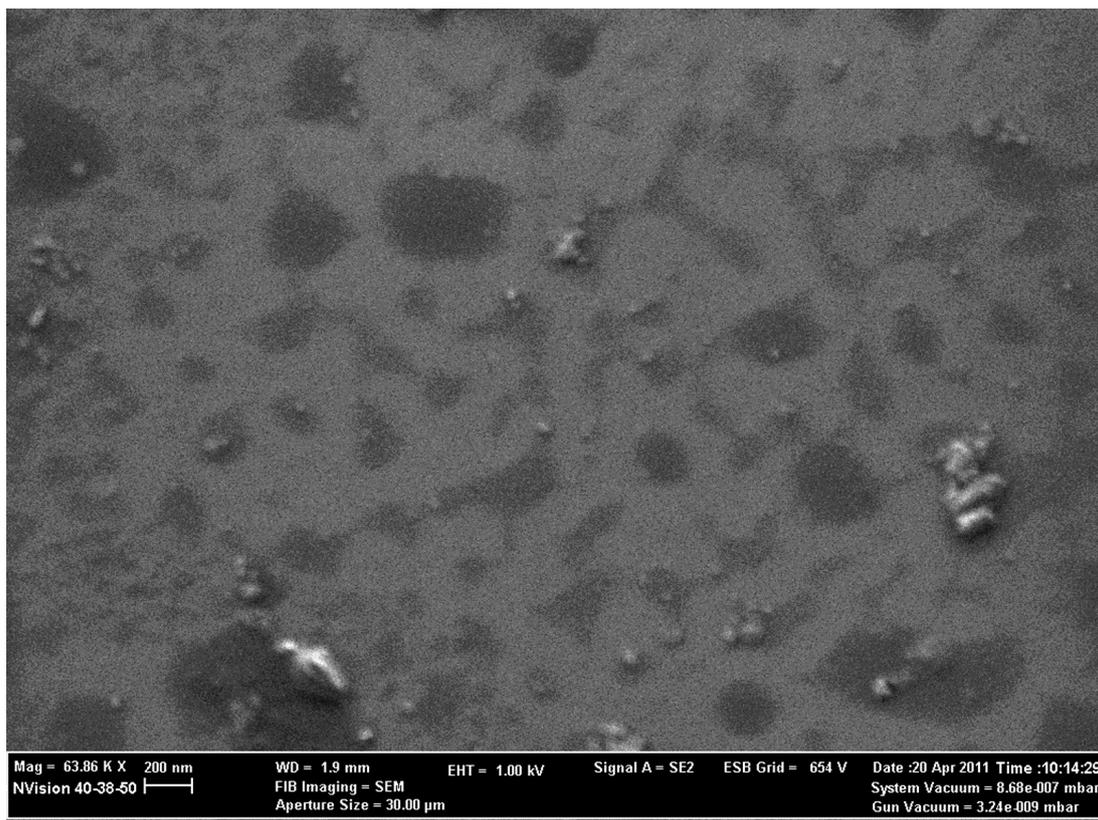
Получение ответа на этот вопрос и являлось основной задачей данной работы.

В качестве объектов исследования использовали выделенные из дерново-подзолистой почвы почвенные гели, нанесенные на атомно-гладкую подложку слюды [21–24]. Причем гели выделяли из гумусоаккумулятивного, иллювиального и элювиального горизонтов.

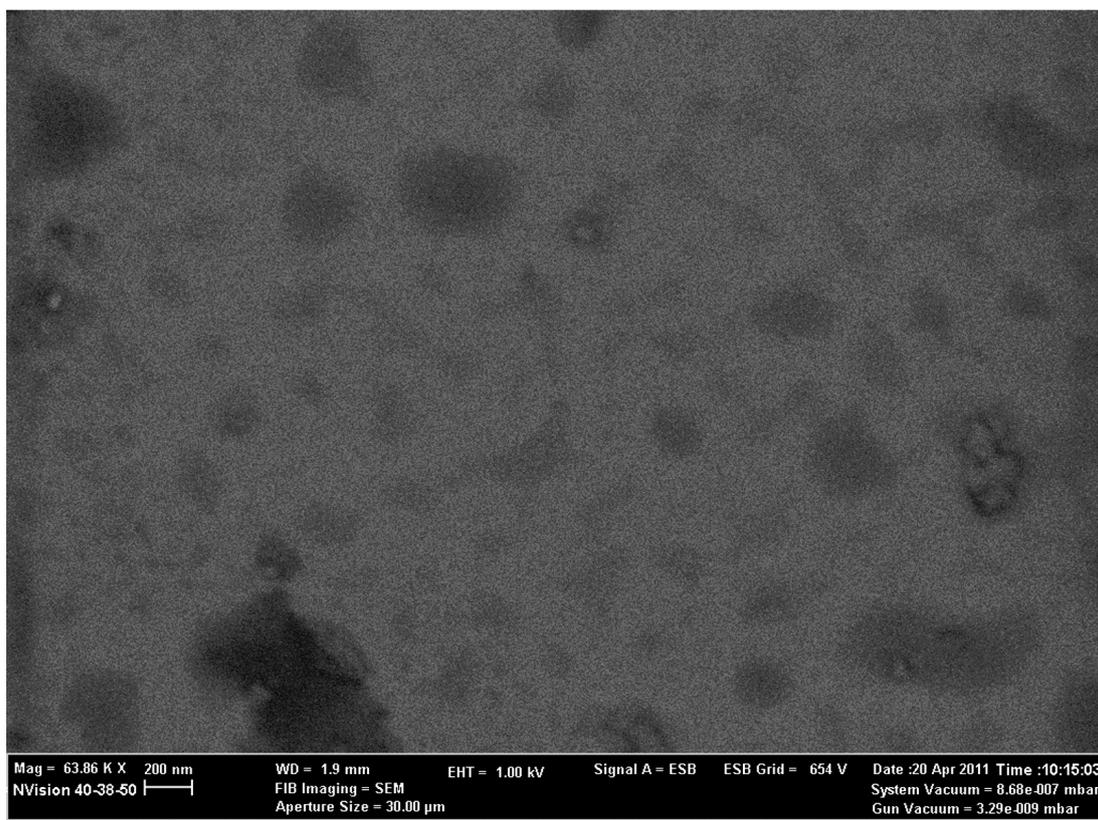
Исследования проводили на высокочувствительном растровом электронном микроскопе Carl Zeiss NVision 40. Данный прибор позволяет исследовать объекты без напыления на них проводящего материала, обеспечивающего снятие заряда с образцов, за счет проведения исследований при малых ускоряющих напряжениях – 1 kV и ниже.

Были получены изображения одних и тех же участков образцов во вторичных и отраженных электронах.

Идеология данного эксперимента основывалась на разных свойствах вторичных и отраженных электронов [28, 29]. Как известно, глубина, с которой выходят вторичные электроны, образующиеся при взаимодействии электронного пучка с образцом, составляет 10 нм и меньше. Отраженные электроны выходят из образца с глубины до 1 мкм. Интенсивность выхода отраженных электронов в отличие от вторичных зависит от среднего атомного номера области, с которой взаимодействует электронный луч – чем выше атомный номер, тем ярче свечение области.



а

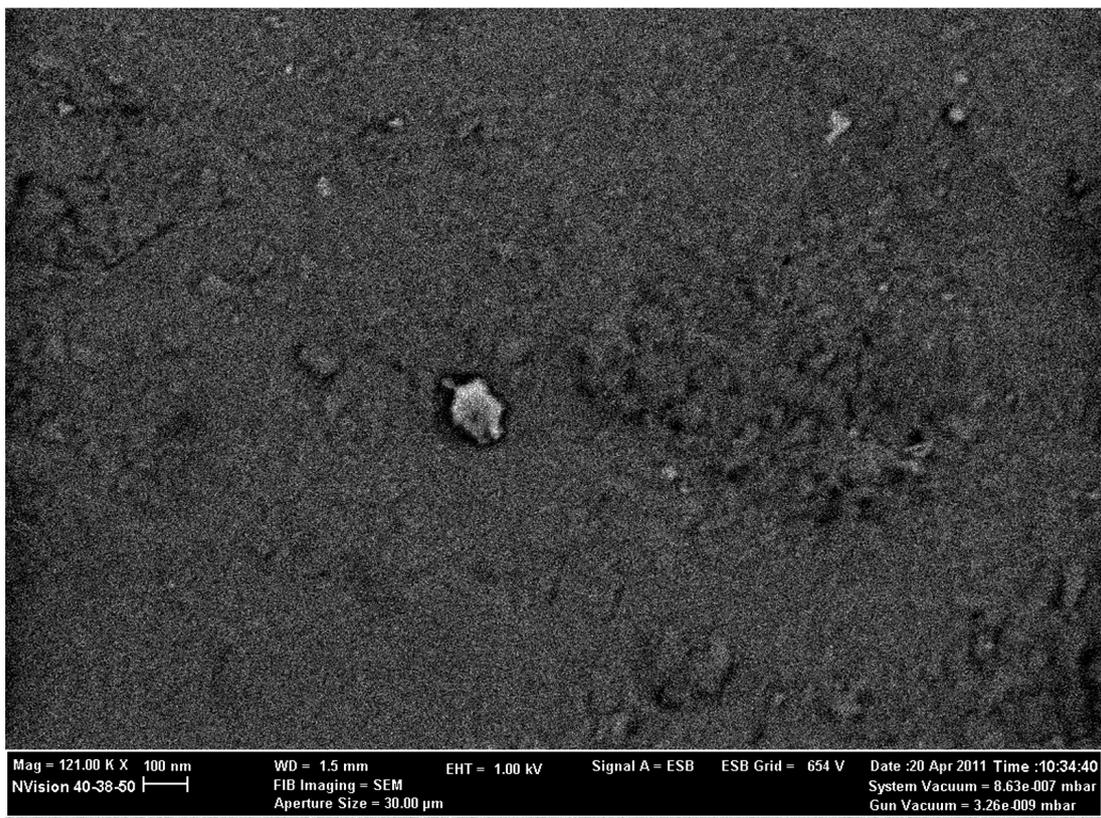


б

Рис. 1. Сравнительные изображения гелей, выделенных из дерново-подзолистой почвы, во вторичных (а) и отраженных (б) электронах, горизонт А

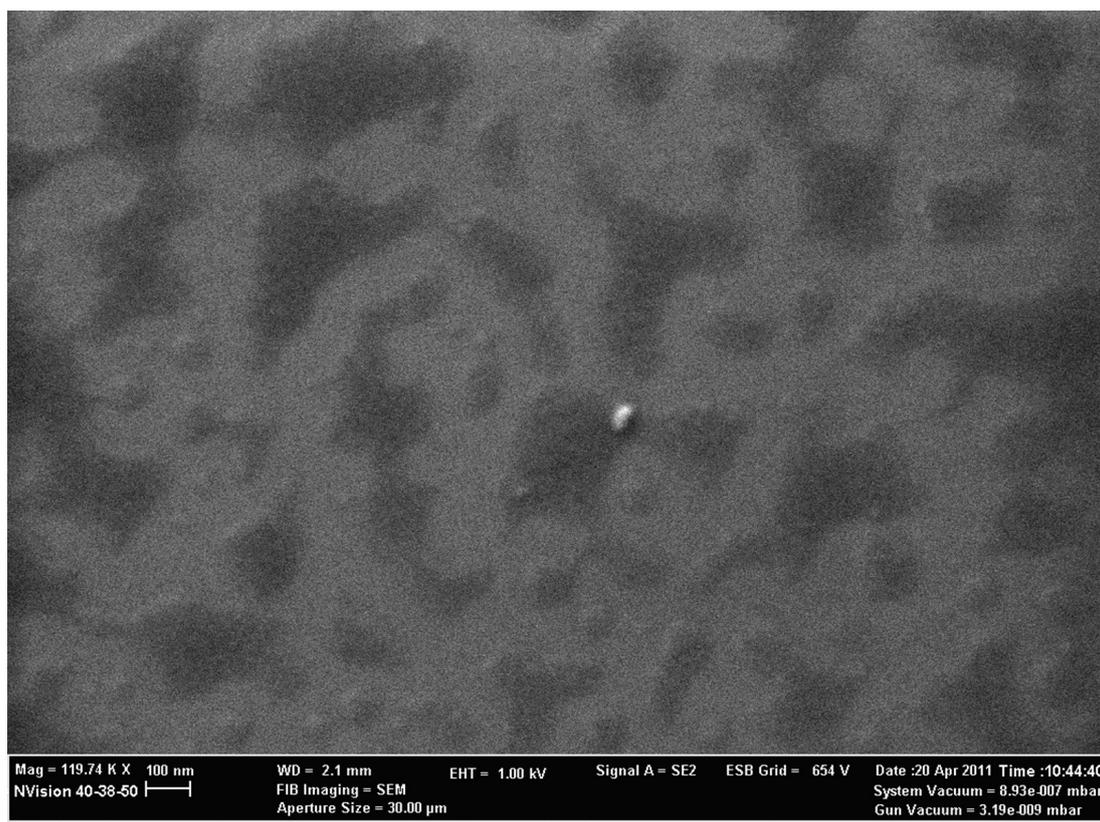


а

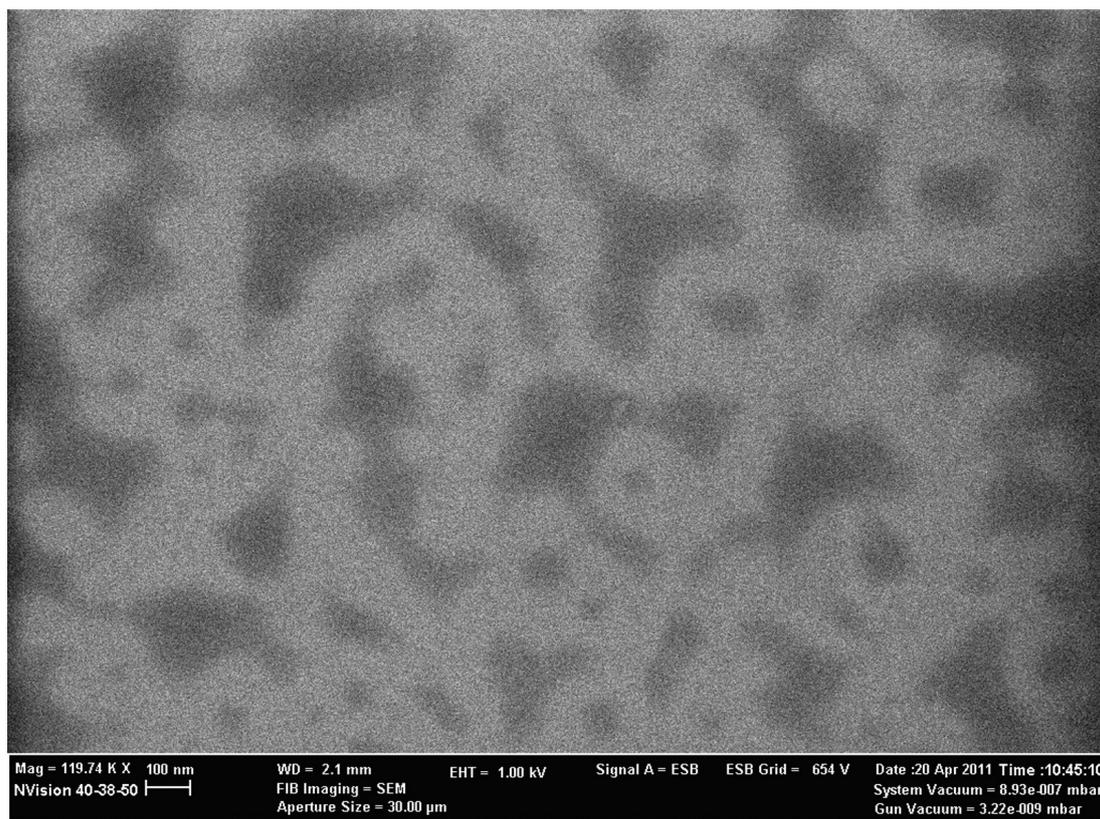


б

Рис. 2. Сравнительные изображения гелей, выделенных из дерново-подзолистой почвы, во вторичных (а) и отраженных (б) электронах, горизонт Е



а



б

Рис. 3. Сравнительные изображения гелей, выделенных из дерново-подзолистой почвы, во вторичных (а) и отраженных (б) электронах, горизонт В

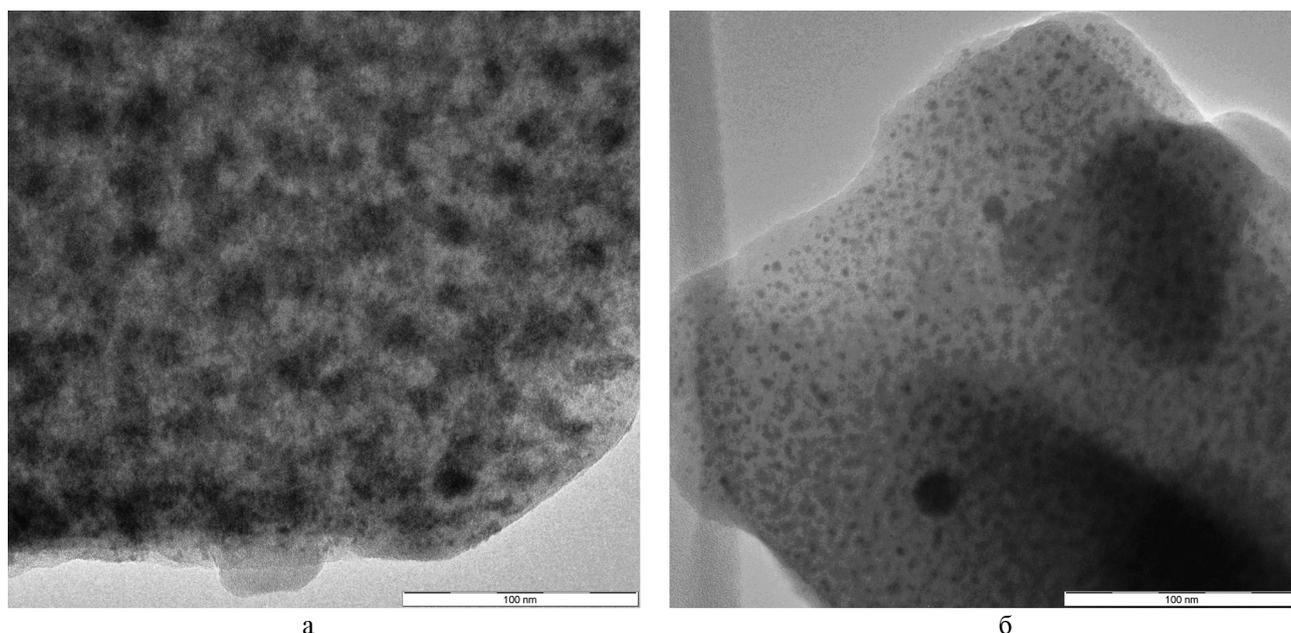


Рис. 4. Электронно-микроскопическое изображение гелевых пленок, выделенных из дерново-подзолистой почвы (а) и чернозема (б), полученное на просвечивающем электронном микроскопе

Толщина слоя геля, как правило, не превышает 1 мкм. Из этого следовало, что при образовании мозаичного органо-минерального геля из органических и неорганических кластеров последние на изображениях, полученных в отраженных электронах, будут светиться значительно ярче, чем на изображениях во вторичных электронах. В том случае, если гели представляют собой органическую матрицу, из-за вероятного взаимодействия электронного луча с подложкой слюды, средний атомный номер которой больше чем у органического геля, и добавления отраженных от слюды электронов к электронам, отраженным от геля, изображение в отраженных электронах будет выглядеть менее контрастным.

Полученные данные (рис. 1–3) свидетельствуют, что гели представляют собой единую органическую матрицу, в которой распределены неорганические образования. Неорганических кластеров, не покрытых органическим веществом – не входящих внутрь гумусовой матрицы в почвенных гелях, выделенных как из гумусоаккумулятивного, так и из других горизонтов дерново-подзолистой почвы, не обнаружено.

Кроме ответа на вопрос о возможности существования в почвах мозаичной матрицы органо-минеральных почвенных гелей

было необходимо оценить влияние неорганических наночастиц на выделение новой фазы при сегрегации гумусовой матрицы.

Для этого были проведены исследования почвенных гелей, выделенных из гумусоаккумулятивных горизонтов дерново-подзолистой почвы и чернозема, на просвечивающем электронном микроскопе Libra 200FE (Carl Zeiss, Германия), снабженном источником с полевой эмиссией, при ускоряющем напряжении 200 кВ.

В гумусовой матрице почвенных гелей хорошо видна микро- и наносегрегация (рис. 4). Причем, сегрегированные области в дерново-подзолистой почве значительно больше по размеру, чем в черноземе. Это может быть связано с меньшим размером фрактальных кластеров из супермолекул гумусовых веществ, образующих гели в черноземе (70–90 нм) по сравнению с фрактальными кластерами из супермолекул ГВ, образующих гели в дерново-подзолистой почве (100–300 нм) [24, 30].

Для проверки влияния кристаллических минеральных частиц на выделение гидрофобной фазы была получена дифракционная картина для областей гелей, в которых наблюдается сегрегация. В результате было установлено, что выделившиеся области новой фазы не содержат кристаллических час-

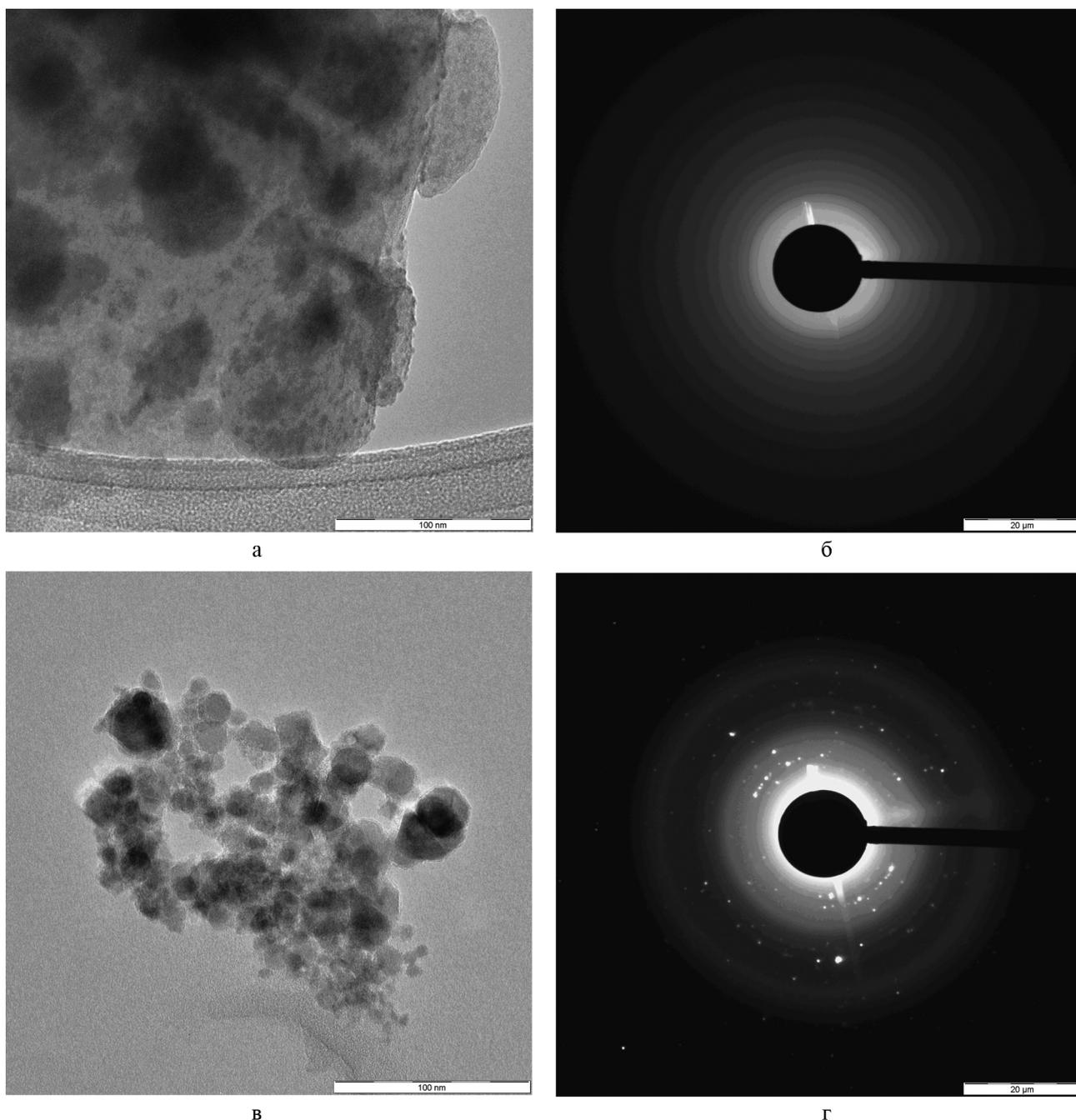


Рис. 5. Электронно-микроскопическое изображение гелевой пленки, выделенной из дерново-подзолистой почвы, полученное на просвечивающем электронном микроскопе (а) и дифракционная картина от этой области (б). Для сравнения представлена дифракционная картина (г) от кристаллических частиц (в)

тиц – на картинке дифракции электронов не обнаружено отдельных рефлексов (рис. 5).

Изучение микрофотографий гелей, выделенных из чернозема, при большом компьютерном увеличении свидетельствует, что размер выделившихся при сегрегации гумусовой матрицы областей в большинстве случаев не превышает 5 нм, а нередко встречаются области размером и 2–3 нм.

Размеры наночастиц неорганических веществ, которые могут находиться в почвах (кремнезем, гидроксиды железа и алюминия, другие вторичные минералы) как правило, превышают 2 нм, что позволяет сделать вывод об их отсутствии в областях сегрегации.

Таким образом, проведенные эксперименты свидетельствуют, что почвенные гели, выделенные из различных горизонтов дерно-

во-подзолистой почвы, не представляют собой мозаичной органо-минеральной матрицы, а минеральные наночастицы не являются зародышами, стимулирующими сегрегацию гумусовой матрицы почвенных гелей.

### Библиографический список

1. Вильямс, В.Р. Почвоведение / В.Р. Вильямс. – М.: СЕЛЬХОЗГИЗ, 1936. – 648 с.
2. Воронин, А.Д. Основы физики почв / А.Д. Воронин. – М.: МГУ, 1986. – 244с.
3. Ганжара, Н.Ф. Почвоведение / Н.Ф. Ганжара. – М.: Агроконсалт, 2001. – 392 с.
4. Почвоведение. Учеб. для ун-тов. Ч. 1. Почва и почвообразование: под ред. В.А. Ковды. – М.: Высш. шк., 1988. – 400 с.
5. Тюлин, А.Ф. Органо-минеральные коллоиды в почве, их генезис и значение для корневого питания высших растений / А.Ф. Тюлин. – М.: АН СССР, 1958. – 52 с.
6. Артемьева, З.С. Органические и органо-глинистые комплексы агрогенно-деградированных почв: автореф. дисс.... д-ра. биол. наук / З.С. Артемьева. – М.: МГУ, 2008. – 51 с.
7. Беседин, П.Н. Состав и свойства коллоидно-илистых фракций и водопрочных агрегатов сероземов и луговых почв / П.Н. Беседин. – Ташкент: САГУ, 1954. – 84 с.
8. Ванюшина, А.Я., Травникова Л.С. Органо-минеральные взаимодействия в почвах (обзор литературы) / А.Я. Ванюшина, Л.С. Травникова // Почвоведение, 2003. – № 4. – С. 418–428.
9. Лейн, З.Я. К вопросу о формах связи гумуса с минеральной частью почв / З.Я. Лейн // Почвоведение, 1940. – № 10. – С. 41–57.
10. Лобицкая, Л.В. Характеристика органической и минеральной частей коллоидов дерново-подзолистой почвы, чернозема и краснозема: автореф. дисс.... канд. с.-х. наук / Л.В. Лобицкая. – Л., 1966. – 16 с.
11. Надь, М. Природа органо-минеральных коллоидов почвы: автореф. дисс.... канд. с.-х. наук / М. Надь. – Л., 1957. – 17 с.
12. Овчинникова, М.Ф. Особенности трансформации гумусовых веществ в разных условиях земледелия (на примере дерново-подзолистой почвы): автореф. дисс.... докт. биол. наук / М.Ф. Овчинникова. – М.: МГУ, 2007. – 51 с.
13. Титова, Н.А. Состав компонентов тонкодисперсных частиц пахотной дерново-подзолистой почвы / Н.А. Титова, Л.С. Травникова, Ю.В. Куваева, И.В. Володарская // Почвоведение, 1989. – № 6. – С. 89–97.
14. Титова, Н.А. Развитие исследований по взаимодействию органических и минеральных компонентов почв / Н.А. Титова, Л.С. Травникова, М.Ш. Шаймухаметов // Почвоведение. – 1995. – № 5. – С. 639–646.
15. Травникова, Л.С. Физическое фракционирование органического вещества с целью изучения его устойчивости к биодеградации: избр. лекции X Всерос. шк. Пушино./ Л.С. Травникова, З.С. Артемьева // Экология и почвы, 2001. – С. 337–346.
16. Травникова, Л.С. Роль продуктов взаимодействия органической и минеральной составляющих в генезисе и плодородии почв / Л.С. Травникова, Н.А. Титова, М.Ш. Шаймухаметов // Почвоведение, 1992. – № 10. – С. 81–96.
17. Хан, Д.В. Органо-минеральные соединения и структура почвы / Д.В. Хан. – М.: Наука, 1969. – 142 с.
18. Федотов, Г.Н. Коллоидные структуры и их влияние на некоторые физические свойства почв / Федотов Г.Н., Добровольский Г.В., Путляев В.И., Гаршев А.В. и др. // Почвоведение, 2006. – № 7. – С. 824–835.
19. Федотов, Г.Н. Уточнение представлений о строении почвенных гелей / Г.Н. Федотов, Ю.Д. Третьяков, В.И. Путляев, Е.И. Пахомов и др. // Доклады АН РФ, 2006. – Т. 411. – № 2. – С. 203–205.
20. Федотов, Г.Н. Гумус как основа коллоидной составляющей почв / Г.Н. Федотов, Г.В. Добровольский // Доклады АН РФ, 2007. – Т. 415. – № 6. – С. 767–771.
21. Федотов, Г.Н. О достоверности определения гранулометрического состава почв седиментационными методами / Г.Н. Федотов, Ю.Д. Третьяков, В.И. Путляев, Е.И. Пахомов и др. // Доклады АН РФ, 2005 – Т. 404. – № 6. – С. 781–784.
22. Федотов, Г.Н. Микрофазное расслоение супраполимерной гумусовой матрицы как процесс, формирующий наноструктурную организацию почвенных гелей / Г.Н. Федотов, Г.В. Добровольский, С.А. Шоба // Доклады АН РФ, 2011. – Т. 437. – № 6. – С. 846–848.
23. Федотов, Г.Н. Механизм возникновения наноструктурной организации в почвенных гелях / Г.Н. Федотов, В.С. Шалаев // Вестник МГУЛ–Лесной вестник, 2011. – № 7. – С. 98–104.
24. Федотов, Г.Н. Строение органического вещества почвенных гелей / Г.Н. Федотов, Г.В. Добровольский // Доклады АН РФ, 2012. – Т. 442. – № 4. – С. 570–573.
25. Piccolo A. The Supramolecular Structure of Humic Substances. Soil Science. 2001. 166 (11). pp. 810–832.
26. Schaumann G.E. Review Article Soil organic matter beyond molecular structure. Part I: Macromolecular and supramolecular characteristics. J. Plant Nutr. Soil Sci. 2006, 169, pp. 145-156.
27. Sutton R, Sposito G. Molecular structure in soil humic substances: The new view. Environmental Science and Technology. 2005. 39. pp. 9009–9015.
28. Рид, С.Дж.Б. Электронно-зондовый микроанализ и растровая электронная микроскопия в геологии / С.Дж.Б. Рид. – М.: Техносфера, 2008. – 232 с.
29. Эгертон, Р.Ф. Физические принципы электронной микроскопии. Введение в просвечивающую, растровую и аналитическую электронную микроскопию / Р.Ф. Эгертон. – М.: Техносфера, 2010. – 304 с.
30. Федотов, Г.Н. Исследование почвенных гелей методом атомно-силовой микроскопии / Г.Н. Федотов Д.М., Иткис, В.И. Путляев, Г.Г. Омелянюк и др. // Доклады АН РФ, 2008. – Т. 421. – № 2. – С. 202–205.

## ОЦЕНКА УГЛЕРОДНОГО БЮДЖЕТА ЛЕСОВ РОССИИ В РАМКАХ ОТЧЕТНОСТИ ПО КИОТСКОМУ ПРОТОКОЛУ

В.Н. КОРОТКОВ, *ведущий научный сотрудник Института глобального климата и экологии Росгидромета и РАН, канд. биол. наук,*

А.А. РОМАНОВСКАЯ, *зав. отделом Института глобального климата и экологии Росгидромета и РАН, д-р биол. наук,*

Р.Т. КАРАБАНЬ, *зав. лабораторией Института глобального климата и экологии Росгидромета и РАН, канд. с.-х. наук,*

Н.С. СМИРНОВ, *младший научный сотрудник Института глобального климата и экологии Росгидромета и РАН*

*korotkovv@list.ru*

Согласно обязательствам Российской Федерации по Рамочной конвенции ООН об изменении климата (РКИК) и Киотскому протоколу Российская Федерация должна ежегодно представлять в органы РКИК национальный кадастр антропогенных выбросов и абсорбции парниковых газов согласно методологии Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) [1, 2]. Согласно МГЭИК, кадастр парниковых газов включает оценки выбросов и поглощения диоксида углерода, метана (CH<sub>4</sub>), закиси азота (N<sub>2</sub>O), окиси углерода (CO) и окислов азота (NO<sub>x</sub>), являющихся следствием антропогенной деятельности в лесном хозяйстве и при землепользовании. Поглощение CO<sub>2</sub> связано с накоплением углерода в биомассе, детрите и органическом веществе почв на лесных землях, а эмиссия – с лесозаготовками, конверсией земель, сопровождающейся полным или частичным изъятием биомассы, лесными пожарами и другими причинами гибели древостоев [1, 2].

Отчетность по пунктам 3 и 4 статьи 3 Киотского протокола включает учет антропогенной деятельности в области землепользования, изменений в землепользовании и лесного хозяйства начиная с 1990 г. Отчетность по пункту 3 статьи 3 Киотского протокола включает учет выбросов и абсорбцию парниковых газов в результате облесения, лесовозобновления и обезлесения. Отчетность по пункту 4 статьи 3 Киотского протокола носит добровольный характер и для отчетности Российской Федерацией выбран один вид деятельности – управление лесным хозяйством.

Учет данных об антропогенных выбросах и абсорбции парниковых газов в результате управления лесным хозяйством проводится на ежегодной основе.

На территории лесного фонда России выделены так называемые управляемые леса, в которые входят лесные земли лесного фонда за исключением резервных лесов. На территории управляемых лесов осуществляются систематическая антропогенная деятельность для выполнения необходимых социальных, экономических и экологических задач по обеспечению рационального, непрерывного и неистощительного лесопользования, воспроизводства, охраны, защиты и мониторинга лесов [3]. В рамках управления лесами проводятся следующие мероприятия: планируются и осуществляются регулярный учет, количественная оценка и анализ состояния лесного фонда; выполняются лесовосстановительные мероприятия и уход за лесом; осуществляется охрана и защита лесов от пожаров и прочих причин гибели лесных насаждений; определяется оптимальный размер лесозаготовок (расчетная лесосека); производятся рубки главного и промежуточного пользования, заготовки недревесного сырья и другой лесной продукции. В настоящей статье представлены результаты расчета углеродного бюджета управляемых лесов, включающего абсорбцию углекислого газа лесами и выбросы парниковых газов в результате рубок, пожаров и других причин гибели древостоев, а также осушения заболоченных лесов. Результирующий углеродный бюджет управляемых лесов представляет собой отчетность



Рис. 1. Динамика площади управляемых лесных земель России (без учета кустарников)



Рис. 2. Динамика возрастной структуры управляемых лесов России (без учета кустарников)

Российской Федерации по пункту 4 статьи 3 Киотского протокола – управление лесным хозяйством.

При государственных учетах лесного фонда в России в состав покрытых лесной растительностью земель включают лесные насаждения с преобладанием древесных и кустарниковых пород с полнотой 0,3 и выше (для молодняков 0,4 и выше) и минимальной площадью от 1 га и более [3]. Таким образом, в состав управляемых лесных земель, согласно данным государственного лесного реестра, включены сообщества с преобладанием как деревьев, так и кустарников. Для отчетности по пункту 4 статьи 3 Киотского протоко-

ла кустарниковые сообщества исключаются, поскольку они не соответствуют принятому в «Национальном докладе РФ об установленном количестве выбросов» [4] определению леса (сообщество деревьев с минимальной полнотой (плотностью стояния) 0,3 (для молодняков 0,4), минимальной высотой деревьев в спелом возрасте 5 м и площадью 1,0 га). Существующие оценки бюджета углерода управляемых лесов [5] включают кустарники и получены с использованием другой методики (по методу «разницы запасов»).

Общая площадь управляемых лесных земель с 1990 по 2009 г. увеличилась на 47,4 млн га за счет перевода из неуправляе-

мых лесных земель (рис. 1). Площадь покрытых лесной растительностью земель управляемых лесов от 1990 к 2009 г. увеличилась на 57,9 млн га. Это объясняется сокращением лесозаготовок более чем в два раза в начале 1990-х гг. [5, 6]. Сокращение площадей новых вырубок за счет сокращения лесопользования происходит одновременно с лесовосстановлением на вырубках более раннего периода, после чего они переходят в состав покрытых лесом земель. Доля непокрытых лесной растительностью площадей от общей площади лесных земель сократилась с 13,2 % в 1990 г. до 10,4 % в 2009 г. (рис. 1).

Отличительной особенностью возрастной структуры управляемых лесов является преобладание спелых и перестойных древостоев (рис. 2), в которых годовое депонирование углерода близко к нулю [7]. В 1990 г. доля спелых и перестойных древостоев составляла 47,5 % от площади управляемых лесов, в 2009 г. – 44,8 %. Доля площади спелых и перестойных древостоев с преобладанием хвойных пород сократилась с 51,3 % в 1990 г. до 47,6 % в 2009 г., что связано с лесозаготовками преимущественно хвойных пород. В то же время наблюдалось увеличение доли площадей спелых и перестойных древостоев с преобладанием мягколиственных пород (с 33,5 % в 1990 г. до 36,7 % в 2009 г.) и с преобладанием твердолиственных пород (с 46,9 % в 1990 г. до 47,3 % в 2009 г.).

Для оценки годовых изменений запасов углерода на лесных землях используется метод МГЭИК по умолчанию, предполагающий вычитание потерь углерода из величин приращения углерода за отчетный период [1, 2]. Для расчетов были использованы методы и специальная программа для расчета выбросов и поглощения  $\text{CO}_2$  на региональном уровне, разработанная Центром по проблемам экологии и продуктивности лесов Российской Академии Наук (ЦЭПЛ РАН) [8–10].

Согласно методологическим рекомендациям МГЭИК, информационно-аналитическая оценка запасов и бюджета углерода проводится для следующих пулов: 1) фитомасса древостоя; 2) мертвая древесина (сухостой и валеж); 3) подстилка; 4) органическое

вещество почвы. Расчеты выполнялись для управляемых лесов России, в которые входят лесные земли лесного фонда за исключением резервных лесов. Для расчетов были использованы данные по управляемым лесам в разрезе субъектов РФ, предоставленные Рослесхозом по состоянию на 1 января 1988, 1993 и 1998–2009 гг. По состоянию на 01.01.2010 г. площадь управляемых лесных земель составляет 664,4 млн га, или 74 % лесных земель страны. Для расчетов использован принцип зонально-провинциального деления территории России, предложенный в работе [6]. В соответствии с этим принципом территория России делится на следующие макрорегионы: Европейско-Уральская часть, Западная Сибирь, Восточная Сибирь и Дальний Восток. Каждый из 4 макрорегионов, в свою очередь, подразделяется на 3 широтные (зональные) полосы: северную (северные редколесья и северная тайга), среднюю (средняя тайга) и южную (южная тайга, смешанные, широколиственные леса и лесостепь). Выбор параметров расчета (конверсионных отношений, эталонных средних значений) осуществляется либо по зональной полосе, либо по зонально-региональному полигону.

Информационно-аналитическая оценка запасов и бюджета углерода по основным пулам включает следующие этапы [8]:

1. Вычисление запаса углерода в пулах древесной фитомассы, мертвой древесины, подстилки и органического вещества почв (слой 0–30 см) на основе статистических данных о площадях и запасах древостоев и системы региональных конверсионных коэффициентов. Конверсионные коэффициенты представляют собой отношение запаса углерода в пуле фитомассы и в пуле мертвой древесины к запасу стволовой древесины, определенных для преобладающих древесных пород и групп возраста. Для подстилки и почвы используются средние значения запасов углерода в этих пулах для разных преобладающих пород и групп возраста на единицу площади.

2. Расчет ежегодного поглощения углерода пулами древесной фитомассы, мертвой древесины, подстилки и органического

вещества почв. Рассчитываются средние на единицу площади значения запасов углерода по каждому пулу в последовательных возрастных группах. Далее, с использованием информации о временном интервале возрастных групп, оценивается средняя годовая абсорбция углерода каждым пулом в данной возрастной группе. Суммарное значение абсорбции углерода каждым пулом в данной возрастной группе преобладающей породы равно произведению среднего годового значения на соответствующую площадь.

3. Оценка ежегодных потерь углерода в результате сплошных рубок, деструктивных пожаров и прочих причин гибели древостоев. При деструктивных нарушениях лесов делается допущение о полном и мгновенном окислении углерода в биомассе и мертвой древесине и частичном снижении запасов углерода подстилки и почвы. Этот подход позволяет учесть послепожарные эмиссии и эмиссии, связанные с разложением органического вещества на вырубках. Для расчетов используются статистические данные по суммарным площадям рубок и гарей. Средние годовые темпы нарушений оцениваются как отношение площадей рубок и гарей к времени их зарастания. Оценка потерь углерода лесами при сплошных рубках проводится по средним значениям углеродных пулов для всех спелых лесов, в которых проводятся рубки. При оценке потерь углерода после пожаров используются средние значения углеродных пулов по всем лесам оцениваемого региона.

4. Расчет ежегодного бюджета по пулам (разница между поглощением и потерями углерода).

Прямые выбросы метана и закиси азота от лесных пожаров проводили по формуле [1]

$$L_{\text{пожар}} = A M_B C_f G_{ef} 10^{-3},$$

где  $L_{\text{пожар}}$  – количество выбросов парниковых газов от пожара, тонн каждого парникового газа, например,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,

$A$  – выжигаемая площадь, га;

$M_B$  – масса доступного для горения топлива, т/га, в т.ч. биомасса, подстилка и валежная древесина;

$C_f$  – коэффициент сгорания, не имеет размерности. Используются значения 0,43 для верхового пожара и 0,15 для низового пожара в бореальных лесах (табл. 2.6 в [1]);

$G_{ef}$  – коэффициент выбросов, г/кг сжигаемого сухого вещества ( $G_{ef} = 4,7$  для метана и  $G_{ef} = 0,26$  для закиси азота (табл. 2.5 в [1])).

Выбросы  $\text{CO}_2$  от осушенных органических лесных почв оценивались на основе доступных статистических данных о площади осушенных лесных земель (раздел 8 формы 3, государственного учета лесного фонда по состоянию на 1998, 2003 гг., данные государственного лесного реестра по состоянию на 2008 г.). При расчетах использован коэффициент выбросов  $\text{EF}_{\text{drainage}} = 0,16$  [2]. По сравнению с 1990 г. наблюдается сокращение выбросов от осушенных органических почв с 374,5 до 312,0 тыс. т С год<sup>-1</sup> в связи с недостаточным объемом работ по поддержанию мелиоративной сети и сокращению площадей осушенных лесных земель. Выбросы  $\text{N}_2\text{O}$  от осушения органических лесных почв выполнены по уровню сложности 1 [2]. При расчетах было сделано допущение о том, что половина площади осушенных лесных почв относится к бедным элементами минерального питания органическим почвам, а половина – к богатым почвам. При расчетах использованы коэффициенты выбросов для бедных элементами минерального питания органических почв  $\text{EF}_{\text{FFdrainage}} = 0,1$  кг  $\text{N}_2\text{O-N}$ /га/г. и для богатых элементами минерального питания органических почв  $\text{EF}_{\text{FFdrainage}} = 0,6$  кг  $\text{N}_2\text{O-N}$ /га/г. [2].

Управляемые леса (без учета кустарников) ежегодно абсорбировали от 251,4 до 292,6 Мт С год<sup>-1</sup> (в среднем – 263,7 Мт С год<sup>-1</sup>). В среднем 74 % абсорбции атмосферного углерода приходилось на фитомассу, 11 % – на мертвую древесину, 3 % – на подстилку и 12 % – на почву (табл. 1).

Потери углерода в результате рубок и гибели лесных насаждений от пожаров и других факторов на управляемых лесных землях изменялись от 132,6 до 217,1 Мт С год<sup>-1</sup> (в среднем – 162,0 Мт С год<sup>-1</sup>) (табл. 2).

Т а б л и ц а 1

**Абсорбция атмосферного углерода управляемыми лесами  
(без учета кустарников) по пулам**

Год	Абсорбция углерода управляемыми лесами по пулам, тыс. т С год <sup>-1</sup>					
	Биомасса надземная	Биомасса подземная	Мертвая древесина	Подстилка	Почва	Итого
1990	144 242,3	40 367,0	25 437,5	8 764,5	32 619,1	251 430,4
1991	144 624,9	40 754,6	25 841,6	8 663,7	32 268,7	252 153,6
1992	144 833,5	41 126,2	26 209,9	8 559,8	31 902,2	252 631,6
1993	145 256,4	41 618,4	26 678,3	8 459,7	31 555,2	253 568,0
1994	146 421,4	41 871,5	27 060,0	8 436,5	31 423,6	255 212,9
1995	147 568,9	42 131,6	27 433,6	8 414,0	31 294,9	256 843,1
1996	148 721,2	42 414,3	27 797,5	8 392,7	31 172,7	258 498,3
1997	149 930,3	42 713,0	28 174,8	8 371,4	31 050,6	260 240,1
1998	151 228,8	43 050,6	28 573,6	8 350,0	30 927,8	262 130,8
1999	151 316,4	42 915,1	28 768,0	8 365,3	31 121,1	262 485,9
2000	153 764,7	43 885,1	29 360,9	8 443,8	31 600,0	267 054,5
2001	153 994,2	44 009,5	29 504,2	8 376,8	31 525,3	267 410,1
2002	155 461,3	44 389,8	29 748,0	8 456,3	31 841,3	269 896,7
2003	156 487,7	44 745,4	29 877,6	8 272,0	31 436,9	270 819,7
2004	156 956,4	44 498,8	29 867,7	8 087,9	30 995,9	270 406,7
2005	154 998,9	44 088,8	29 396,0	7 909,3	30 910,7	267 303,7
2006	155 432,9	44 156,5	29 663,2	7 821,6	30 683,2	267 757,4
2007	155 397,3	44 223,7	29 611,3	7 670,8	30 147,2	267 050,3
2008	155 806,7	44 690,1	29 717,1	7 622,0	29 860,5	267 696,3
2009	172 217,9	47 936,1	33 265,2	7 885,3	31 291,4	292 595,9

Т а б л и ц а 2

**Потери углерода управляемыми лесами в результате пожаров  
и других антропогенных воздействий**

Годы	Потери углерода управляемыми лесами, тыс. т С год <sup>-1</sup>			
	Деструктивные пожары и другие причины гибели насаждений	Сплошные рубки	Осушение органических почв	Всего потерь
1990	92 567,8	121 729,4	374,5	214 671,6
1991	92 172,9	122 947,7	374,5	215 495,1
1992	91 725,7	124 279,6	374,5	216 379,8
1993	91 211,7	125 933,5	374,5	217 519,7
1994	88 353,1	114 791,3	374,5	203 519,0
1995	85 502,5	103 675,1	374,5	189 552,1
1996	82 659,8	92 583,4	374,5	175 617,7
1997	79 824,8	81 514,2	374,5	161 713,5
1998	76 997,4	70 464,6	374,5	147 836,5
1999	85 129,0	61 974,3	362,9	147 466,2
2000	83 788,3	56 653,9	351,3	140 793,5
2001	84 727,5	53 309,5	339,7	138 376,8
2002	85 516,6	52 223,9	328,1	138 068,6
2003	85 717,5	51 790,2	316,4	137 824,1
2004	86 913,8	52 486,9	316,4	139 717,1
2005	84 799,6	53 619,7	316,4	138 735,7
2006	82 755,7	52 737,1	316,4	135 809,2
2007	80 762,1	54 021,9	316,4	135 100,3
2008	75 303,3	57 288,6	312,0	132 903,9
2009	78 816,6	61 861,2	312,0	140 989,8

**Выбросы CH<sub>4</sub> и N<sub>2</sub>O в управляемых лесах России**

Год	Выброс от пожаров, тыс. т CO <sub>2</sub> -эquiv. год <sup>-1</sup>		Выброс от осушения органических почв, тыс. т CO <sub>2</sub> -эquiv. год <sup>-1</sup>	Суммарный выброс, тыс. т CO <sub>2</sub> -эquiv. год <sup>-1</sup>
	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O		
1990	10036,0	8195,6	254,0	18485,6
1991	9092,0	7424,7	254,0	16770,7
1992	9211,3	7522,1	254,0	16987,3
1993	9283,6	7581,2	254,0	17118,8
1994	8822,2	7204,3	254,0	16280,5
1995	8400,2	6859,8	254,0	15514,0
1996	10518,1	8589,2	254,0	19361,3
1997	8484,6	6928,7	254,0	15667,2
1998	13378,6	10925,2	254,0	24557,7
1999	8914,8	7280,0	246,1	16440,9
2000	9840,3	8035,7	238,2	18114,2
2001	9532,4	7784,3	230,3	17547,0
2002	10549,0	8614,5	222,5	19386,0
2003	11905,1	9721,9	214,6	21841,6
2004	9079,3	7414,3	214,6	16708,2
2005	9599,0	7838,7	214,6	17652,4
2006	10099,9	8247,7	214,6	18562,2
2007	9561,5	7808,1	214,6	17584,1
2008	10906,1	8906,1	211,6	20023,9
2009	11620,2	9489,3	211,6	21321,1

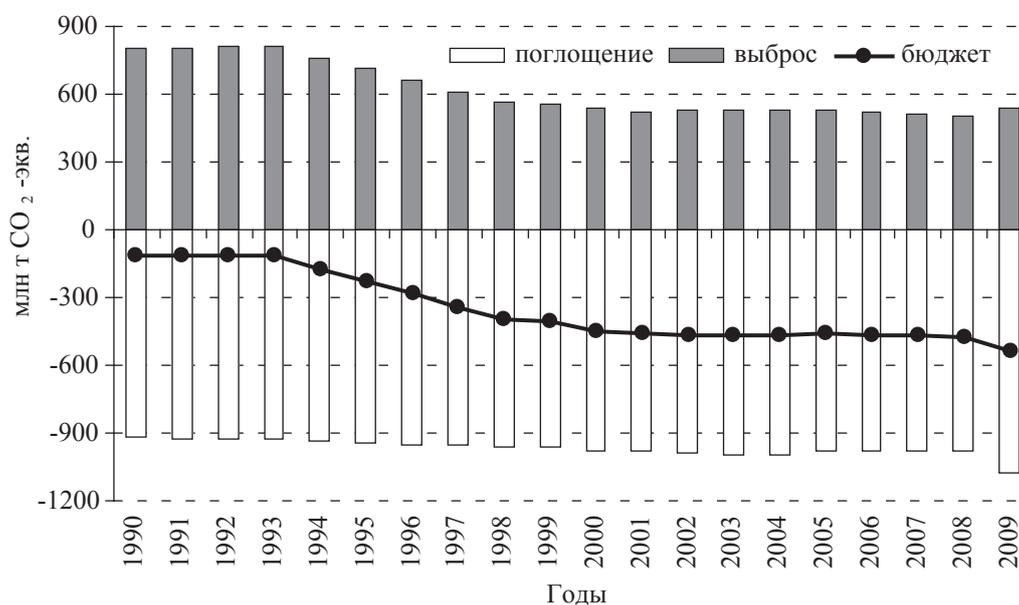


Рис. 3. Бюджет CO<sub>2</sub> управляемых лесов России без учета кустарников (в сумме по пулам фитомассы, мертвой древесины, подстилки и почвы)

В среднем 66 % потерь углерода приходилось на фитомассу, 12 % – на мертвую древесину, 4 % – на подстилку, 18 % – на почву. В начале 1990-х гг. значительная доля потерь углерода была связана со значительным объ-

емом лесозаготовок, которые сократились к 1998 г. Вторым наиболее значительным фактором, определяющим потери углерода, является гибель лесных насаждений в основном в результате деструктивных пожаров.

Высокий вклад выбросов  $\text{CO}_2$  в результате пожаров и других причин гибели насаждений в общенациональные выбросы базового года в России объясняется методикой оценки потерей углерода, которая включает не только прямые выбросы в результате горения органического вещества, но и послепожарные выбросы (при допущении о полном окислении органического вещества в результате пожара). Выбросы  $\text{CH}_4$  и  $\text{N}_2\text{O}$  в управляемых лесах России приведены в табл. 3. Значительная вариация выбросов парниковых газов в табл. 3 обусловлена воздействием природных и антропогенных факторов, определяющих условия возникновения и характер пожаров в лесах.

По сравнению с 1990 г. наблюдается сокращение выбросов от осушенных органических почв с 374,5 до 312,0 тыс. т  $\text{C}$  год<sup>-1</sup> в связи с недостаточным объемом работ по поддержанию мелиоративной сети и сокращению площадей осушенных лесных земель (табл. 2). По сравнению с 1990 г. выбросы  $\text{N}_2\text{O}$  от осушенных органических почв сократились с 0,82 тыс. т  $\text{N}_2\text{O}-\text{N}$  год<sup>-1</sup> в 1990 г. до 0,68 тыс. т  $\text{N}_2\text{O}-\text{N}$  год<sup>-1</sup> в 2009 г. (табл. 3).

За весь рассматриваемый период поглощение  $\text{CO}_2$  управляемыми лесами РФ (без учета кустарников) превышало его потери, то есть наблюдался сток атмосферного углерода в объемах от 116,3 Мт  $\text{CO}_2$ -экв. год<sup>-1</sup> в 1990 г. до 534,6 Мт  $\text{CO}_2$ -экв. год<sup>-1</sup> в 2009 г. (среднее значение – 349,3 Мт  $\text{CO}_2$ -экв. год<sup>-1</sup>) (рис. 3). Итоговые величины углеродного баланса управляемых лесов Российской Федерации отражают всю совокупность мер по лесопользованию: лесопользование, лесовосстановление, охрану и защиту лесов. Одна из основных причин, по которой леса за рассматриваемый период являлись стоком углерода, связана с двукратным снижением уровня лесопользования, имевшем место в начале 1990-х гг.

### Библиографический список

1. Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК, 2006 г. Т. 4. Сельское хозяйство, лесное хозяйство и другие виды землепользования. Программа МГЭИК по национальным кадастрам парниковых газов. МГЭИК, 2006. // Целевая группа по национальным кадастрам парниковых газов МГЭИК. Хаяма, 2006. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html> (дата обращения 15.06.2011).
2. Руководящие указания по эффективной практике для землепользования, изменений в землепользовании и лесного хозяйства. Программа МГЭИК по национальным кадастрам парниковых газов. МГЭИК, 2003. // Целевая группа по национальным кадастрам парниковых газов МГЭИК. Хаяма, 2003. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpplulucf/gpplulucf.html> (дата обращения 15.06.2011).
3. Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом, за 1990–2009 гг. Часть 1. М., 2011. // UNFCCC.INT: сайт РКИК ООН. 2011. [http://unfccc.int/national\\_reports/annex\\_i\\_ghg\\_inventories/national\\_inventories\\_submissions/items/5888.php](http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/items/5888.php) (дата обращения 14.06.2011).
4. Национальный доклад РФ об установленном количестве выбросов. М.: Министерство природных ресурсов РФ, 2007. РКИК ООН. [http://unfccc.int/national\\_reports/initial\\_reports\\_under\\_the\\_kyoto\\_protocol/items/3765.php](http://unfccc.int/national_reports/initial_reports_under_the_kyoto_protocol/items/3765.php) (дата обращения 15.06.2011).
5. Замолодчиков, Д.Г. Бюджет углерода управляемых лесов Российской Федерации / Д.Г. Замолодчиков, Г.Н. Коровин, М.Л. Гитарский // Лесоведение. – 2007. – № 6. – С. 23–34.
6. Замолодчиков, Д.Г. Оценка пула углерода крупных древесных остатков в лесах России: учет влияния пожаров и рубок / Д.Г. Замолодчиков // Лесоведение. – 2009. – № 4. – С. 3–15.
7. Исаев, А.С. Оценка запасов и годичного депонирования углерода в фитомассе лесных экосистем России / А.С. Исаев, Г.Н. Коровин, А.И. Уткин, А.А. Пряжников и др. // Лесоведение. – 1993. – № 5. – С. 3–10.
8. Методика информационно-аналитической оценки бюджета углерода лесов на региональном уровне // WWW.CEPL.RSSI.RU: сайт Центра по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН. 2011. <http://www.cepl.rssi.ru/programms.htm> (дата обращения 15.06.2011).
9. Замолодчиков, Д.Г. Коэффициенты конверсии запасов насаждений в фитомассу основных лесобразующих пород России / Д.Г. Замолодчиков, А.И. Уткин, О.В. Честных // Лесная таксация и лесостроительство. – 2003. – Вып. 1(32). – С. 119–127.
10. Честных, О.В., Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И. Общие запасы биологического углерода и азота в почвах лесного фонда России / О.В. Честных, Д.Г. Замолодчиков, А.И. Уткин // Лесоведение. – 2004. – № 4. – С. 30–42.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ НАНОТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ПОДГОТОВКЕ СЕМЯН К ПОСЕВУ

А.Р. РОДИН, *проф. каф. лесных культур МГУЛ, засл. лесовод РСФСР, д-р с.-х. наук,*  
Е.А. КАЛАШНИКОВА, *проф. РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, д-р с.-х. наук*

*kalash0407@mail.ru*

Важной проблемой лесного хозяйства России является воспроизводство лесов. При этом новые искусственные леса создают главным образом семенным способом – посадкой растений, выращенных из семян или посевом семян. Результативность искусственных лесов во многом зависит от жизнеспособности биологической системы семян в период их посева в грунт, и это недостаточно учитывается при выращивании посадочного материала. Подтверждением этому, в определенной степени, являются завышенные нормы высева. Например, в соответствии с действующими нормами при выращивании сеянцев сосны на один погонный метр посевной строчки высевают 250 семян первого класса качества, а плановый выход сеянцев составит 43 растения [3].

Для повышения биологической активности семян в этот период применяют различные способы подготовки их к посеву. Например, сейчас уже обнаружено и изучено в той или иной степени более 5 тыс. соединений химического, микробиологического и растительного происхождения, обладающих регуляторным действием. Из них в мировой практике используется около 1 %. Вышли на стадию практического применения препараты третьего поколения, гектарные дозы которых исчисляются миллиграммами. В последнее время находят применение экологически чистые биопрепараты на основе молочнокислых бактерий и полезных микроорганизмов, обеспечивающих активацию прорастания семян в грунте [2].

Проведенные нами теоретические и экспериментальные поисковые исследования позволяют считать, что перспективными способами подготовки семян хвойных пород будет предпосевная обработка их путем использования нанотехнологий.

Активизация жизнеспособности биологической системы семян, повышение грунтовой всхожести и усиление роста проростка достигается обработкой семенного материала нанопорошками – наноразмерными частицами металлов. Эти частицы имеют размер от 18 до 50 нанометров, что позволяет им легко проникать через поры и распределяться внутри семени. Активные компоненты нанопорошков составляют металлы (железо, медь, марганец, цинк и магний) в ультрадисперсном состоянии. Эти препараты обладают уникальными свойствами: они экологически безопасны, экономически выгодны и способствуют более эффективному повышению продуктивности растений. Кроме того, обработка семян, например наночастицами серебра, приводит к ингибированию развития патогенной микрофлоры, что обеспечивает формирование из семян высококачественного посадочного материала с его дальнейшим сохранением.

При обработке нанопорошками металлов покой семян прерывается и биологическая система переходит в возбужденное состояние.

В этом случае электроны атомов переходят на более высокие энергетические уровни; в эндосперме и в зародыше семян активизируются ферменты, приводящие к усиленному переводу запасных питательных веществ из неусвояемой для зародыша и проростка формы в усвояемую в виде сахаров (сахароза, фруктоза, глюкоза, раффиноза), свободных аминокислот и органических кислот; усиливается протекание окислительных процессов, приводящих к образованию физиологически активных веществ, положительно влияющих на зародыш и вызывающих его интенсивный рост и развитие; возрастает дыхание; происходят физико-химические из-

менения в семенах, что обеспечивает начало роста зародыша.

Положительное влияние обработки наноразмерными частицами металлов объясняется и тем, что ионы металлов являются энергетическими источниками и участвуют в переносе электронов при дыхании лесных и травянистых растений и синтезе хлорофилла. При взаимодействии с биологическими объектами нанопорошки металлов представляют множество источников энергии ионов металлов, постоянно образующих определенную концентрацию вокруг каждой частицы.

Таким образом, при предпосевной подготовке семян лесных растений наноразмерными частицами металлов прерывается состояние покоя семенного материала, активизируются биохимические процессы в биологической системе семени, энергия прорастания и всхожесть повышаются, а образовавшиеся всходы и проростки из таких семян отличаются более интенсивным ростом и повышенным иммунитетом к болезням и вредителям.

При подготовке семян к посеву в перспективе может быть использована также квантово-резонансная технология (SSF), разработанная российскими учеными и запатентованная в России и в Евроазиатской патентной конвенции. Она включает элементы нанотехнологии, когерентной химии, теории нелинейных колебаний, стохастического резонанса, эффекта сверхмалых доз, нацеленной на управляемое изменение характеристик биологических объектов различной природы. Применяемый водородный газоразрядный генератор генерирует сверхслабое поле [1].

Экспериментально доказано, что воздействие SSF на растительный организм приводит к активации электронного комплекса молекул, их ионизации, образованию свободных радикалов и т.д., что, в свою очередь, повышает интенсивность биохимических реакций, активность ферментных систем и изменяет метаболизм в целом растении. Этот комплекс условно можно разделить на 3 этапа, гармонично перетекающих друг в друга:

1) физический этап – возбуждение атомов и молекул, разрыв некоторых хими-

ческих связей, образование коротко- и долгоживущих парамагнитных частиц, излучение энергии и др.;

2) химический этап – усиление окислительно-восстановительных реакций, изменение скорости ферментных реакций и трансмембранного переноса вещества, активизация биосинтеза, изменение макромолекул и, в некоторых случаях, нуклеиновых кислот, белков, комплексных полисахаридов и т.д.;

3) биологический этап – изменение мембранных систем и биохимических структур клеток, метаболизм, эпигенез, морфогенез, мутагенез, продуктивность и т.д.

На химическом и биологическом этапах действие поля аналогично действию эндогенных гормонов или синтетических регуляторов роста, связанных с активацией структурно-метаболических и эпигенетических процессов в биообъектах.

Использование квантово-резонансной технологии активизирует физиолого-биохимические процессы семян, в результате чего повышается их грунтовая всхожесть, усиливается рост проростка.

Например, было установлено, что после восьмилетнего хранения всхожесть семян ели европейской составляла 23 %, а лиственницы сибирской – 28 %. После их обработки SSF всхожесть повысилась и составила соответственно 48 % и 71 %. Эффективность нанотехнологий и квантово-резонансной возрастает при обработке долго хранившихся семян или хранившихся в неблагоприятных условиях.

#### Библиографический список

1. Калашникова, Е.А. Перспективы использования энергоинформационного поля при искусственном лесовыращивании / Е.А. Калашникова, В.М. Ковалев, Д.В. Белов, А.Р. Родин // Лесное хозяйство. – 1998. – № 4. – С. 21–23.
2. Родин, А.Р., Попова Н.Я., Стукушин Н.М. Использование высокоэффективных фиторегуляторов роста при выращивании посадочного материала / А.Р. Родин, Н.Я. Попова, Н.М. Стукушин // Вестник МГУЛ–Лесной вестник. – 2000. – № 6 (15). – С. 189–190.
3. Справочник лесовода: под общ. ред. В.П. Ращупкина. – М.:ВНИИЛМ. – 2007. – 608 с.

## УГЛЕРОД ДРЕВНИХ ПОЧВ – ИСТОЧНИК ЭМИССИИ С В АТМОСФЕРУ

М.Г. РОМАНОВСКИЙ, *гл. научн. сотр. Института лесоведения РАН, д-р биол. наук**root@ilan.ras.ru*

Потоки С, ассимилированного автотрофами и возвращаемого в атмосферу гетеротрофами, при стабильном состоянии биогеоценоза уравниваются. Экосистемная нетто-продукция NEP (netto ecosystem production), равная разности стока и эмиссии углерода, в устойчивом состоянии биогеоценоза  $NEP \approx 0$  [3, 12; 18]. Современные широколиственные леса в европейской лесостепи неустойчивы, эмиссия С существенно превышает «сток» за счет истощения запасов почвенного С.

Гетеротрофы в нагорных лесостепных ясене-дубравах имеют биомассу  $\sim 0,8$  т С га<sup>-1</sup>, – ничтожную в сравнении с фитомассой, которая в одних лишь живых клетках, содержащих протопласт, колеблется (зима–лето) между 30 и 35 т С га<sup>-1</sup> [18]. Однако, если рассмотреть годовые приросты фитомассы ( $\sim 3$  т С га<sup>-1</sup> год<sup>-1</sup>) и вторичной биомассы ( $\sim 1$  т С га<sup>-1</sup> год<sup>-1</sup>), мы увидим, что они различаются не столь значительно. Дисбаланс автотрофного стока С в фитомассу и эмиссии С при построения годичной продукции гетеротрофной («вторичной») биомассы  $\Delta M_{II}$ , в лесных биогеоценозах лесостепи определяет  $NEP - 0,65$  т С га<sup>-1</sup> год<sup>-1</sup>.

При ступенчатом разложении фитомассы, созданной за год автотрофами широколиственного леса, только 1/3 нетто-продукции (NPP, netto primary production) превращается в прирост биомассы гетеротрофов. Средний годичный прирост биомассы гетеротрофов  $\Delta M_{II} = NPP \sum_{0-25^n} = 1/3 NPP$ ; где  $n \rightarrow \infty$ ;  $0,25 = 1 - 0,75 = 1 - Rg$ ;  $Rg = 0,75$  – дыхательные затраты гетеротрофов. Дыхание гетеротрофов уносит  $\sim 3/4$  метаболизируемого органического «горючего» [15]. Отпад и клеточный «опад» гетеротрофов, неусвоенная пища и пищевые отходы подвергаются дальнейшей переработке другими организмами. Мир гетеротрофов формирует свой годичный прирост в результате ступенчатой переработки фитомассы.

Правило превращения  $\sim 1/3$  NPP продукции фитоценоза в прирост вторичной биомассы (на 8 % виртуальный) и возвращения в атмосферу по каналам  $Rg \sim 0,75$  углерода, зафиксированного растительностью, соответствует оптимальному режиму работы гетеротрофов над разложением фитомассы в сбалансированной экосистеме. Равенство годового прироста вторичной биомассы  $\Delta M_{II} \approx 1/3 NPP$  (при  $Rg \approx 0,75$ ) – условие устойчивого развития ( $NEP = 0$ ) не одних только лесостепных экосистем. Такой же уровень гетеротрофного дыхания  $Rg \approx 0,75$  свойственен, вероятно, и лесным и травяным экосистемам от степей до южной тайги включительно [12, 15].

При  $\Delta M_{II} < 1/3 NPP$  углерод накапливается в экосистеме,  $NEP > 0$ .

При  $\Delta M_{II} > 1/3 NPP$  углерод излучается в атмосферу,  $NEP < 0$ .

Калькуляция прироста вторичной биомассы по данным 60 лет исследований в Теллермановском опытном лесничестве ИЛАН, представленная в таблице, дает актуальную величину  $\Delta M_{II} = 1,1$  т С га<sup>-1</sup> год<sup>-1</sup>. Это в «спокойные» годы, в годы массовых размножений консументов прирост вторичной биомассы достигает  $\Delta M_{II} = 2,2$  т С га<sup>-1</sup> год<sup>-1</sup>. Соответственно, средняя многолетняя годовая продукция фитомассы, способная обеспечить такой прирост гетеротрофов, должна составлять  $NPP_{opt} = 3 \Delta M_{II}$ , что на  $0,35$  т С га<sup>-1</sup> год<sup>-1</sup> выше фактических значений  $NPP = 2,95$  т С га<sup>-1</sup> год<sup>-1</sup> в «спокойные» годы и на  $3,8$  т С га<sup>-1</sup> год<sup>-1</sup> во время вспышек. Приняв условно, что вспышечные подъемы численности у разных групп гетеротрофов синхронны, а соотношение нормальных и «вспышечных» лет  $\sim 1:11$ , получим оценку среднего значения  $NEP \approx -0,65$  т С га<sup>-1</sup> год<sup>-1</sup>.

Итак, исходя из соотношения годовых приростов  $NPP$  и  $\Delta M_{II}$ , экосистемная нетто-продукция  $NEP = NPP - 3 \Delta M_{II} \approx -0,6 \div -0,7$  т С га<sup>-1</sup> год<sup>-1</sup>. Возможно,  $NEP$  меньше

**Годичный прирост биомассы автотрофов NPP и гетеротрофов  $\Delta M_{II}$  во внепойменных дубравах Теллермановской рощи. По [12] с уточнениями**

Функционально-систематические группы	Прирост*, т га <sup>-1</sup> год <sup>-1</sup>	
	биомасса	углерод
<i>Автотрофы</i> – фотосинтезирующие зеленые растения (NPP)	~ 5,8–6	~ 2,9–3
<i>Гетеротрофы</i> ( $\Delta M_{II}$ ):		
Почвенные микроорганизмы	1,1 (1,8)	0,55
Грибы (сапротрофы, факультативные биотрофы, микориза)	0,5 (1,1)	0,25
Почвенные беспозвоночные (сапротрофы 80 %)	0,3 (0,8)	0,15
Фитофаги биотрофы (беспозвоночные и грибы)	0,3 (0,8)	0,15
Позвоночные, консументы I и высших порядков	< 0,01 (0,02)	0,00
Всего гетеротрофы	2,2 (4,5)	1,1 (2,2)

\* В скобках приведены оценки максимальных значений продуктивности в годы массового размножения гетеротрофов; частота таких лет ~9 %.

принятой нами приближенной оценки  $NEP \approx -0,65$  т С га<sup>-1</sup> год<sup>-1</sup>. Некоторые группы гетеротрофов при нашем, достаточно поверхностном, подсчете не учтены. Так, годовая продуктивность основных представителей почвенной микрофауны – панцирных клещей (*Oribatei*) в широколиственных лесах может достигать ~0,1 т С га<sup>-1</sup> год<sup>-1</sup> [6].

На современном этапе развития нагорных широколиственных лесов европейской лесостепи России избыточная продукция биомассы гетеротрофов ведет к истощению пула С, накопленного в темно-серых лесных почвах за последнепровский плейстоцен и голоцен. Мощность гумусоаккумулятивного горизонта сокращается на ~1 мм год<sup>-1</sup>. Сходные оценки потерь почвенного С по дисбалансу прихода и расхода С (0,35÷0,61 т С га<sup>-1</sup> год<sup>-1</sup>) получены и для возделываемых земель России [10, 11].

Сегодня мы не находим гумусо-аккумулятивных горизонтов мощностью 80 см, а тем более 100 см, отмечавшихся в описаниях темно-серых лесных почв и лесных черноземов 50, 60, 100-летней давности. Точно так же, нет теперь степных черноземов, содержащих 8–10 % гумуса [5]. Дело здесь не только в совершенствовании методов определения органического вещества почв, но и в объективном уменьшении запасов гумуса. Вероятная скорость истончения гумусо-аккумулятивного горизонта потрясает воображение – для Шипова леса, к примеру, это оценочно около 25–50 см за столетие (по 2,5–5 мм год<sup>-1</sup>).

Быстрее всего деградируют почвы с наибольшими запасами углерода (за 100 лет потеряно оценочно 50–75 % мощности горизонта А); маломощные низкопроизводительные почвы теряют запас органического С медленнее (не более 10 % за 100 лет) [18, с. 81, рис. 2.15].

Отметим, что уникальность запасов органического вещества в черноземах лесостепи [5], по сравнению с лесными почвами той же зоны, преувеличена. Такой же запас углерода, как в черноземах, в темно-серых лесных почвах распределен по значительно более глубокому профилю. На степных водоразделах запасы органики ограничены слоем 0–100 см; 0–150 см, – в лесных биогеоценозах гумусированные слои (до ~1 % органических веществ) обнаружены на глубине 6–9 м [18]. То же касается и почвенно-грунтовых запасов биогенного С(CaCO<sub>3</sub>) – неизвестно, где его больше, под лесными или степными локусами ландшафта [1; 18].

Почвы лесостепных плакоров (и лесных и степных) являются мощным источником эмиссии в атмосферу углеродсодержащих газов. Несбалансированная эмиссия С(CO<sub>2</sub>) лесостепными биогеоценозами не исчерпывается избыточной активностью гетеротрофных организмов в поверхностных слоях почвы и в надземных частях фитоценоза, при дыхании которых «сверх нормы» выделяется ~0,65 т С га<sup>-1</sup> год<sup>-1</sup> (таблица). Излучение С(CO<sub>2</sub>), зафиксированное в полевых экспериментах, намного превышает эту величину. Так, А.Г. Молчанов [8, с.228] в полево-кленовой дуб-

раве III класса бонитета зарегистрировал избыточную эмиссию  $C(CO_2)$  из почвы по  $1-3 \text{ т С га}^{-1} \text{ год}^{-1}$  за период вегетации (120 дней). В типичный год, когда половина вегетации характеризуется оптимальной влагообеспеченностью, а другая – недостаточной,  $NEP$  за 120 дней составила  $-2,4 \text{ т С га}^{-1} \text{ год}^{-1}$  [8, табл. 46 и 48]. Еще большую величину потерь углерода  $\geq 4 \text{ т С га}^{-1} \text{ год}^{-1}$  дают расчеты по данным Д.Ф. Соколова для высоко производительной осоково-снытевой дубравы I–II класса бонитета [13, 18].

При  $\psi_s < -1,5 \text{ МПа}$  корни прекращают активное поглощение почвенной влаги. При дальнейшем обезвоживании почвы  $R(\psi_s)$  сокращается линейно. После полного «отключения» дыхания почвенной биоты (корней растений, гетеротрофов) сохранится уровень  $R$  не менее  $1,7 \text{ мг CO}_2 \text{ дм}^{-2} \text{ ч}^{-1}$  или  $\geq 4,1 \text{ т С га}^{-1} \text{ год}^{-1}$ .

Днепровское оледенение (~180–240 куг ВР), подобно серии позднейших (10–160 куг ВР), распадается на ряд последовательных гляциальных фаз, разделенных интерстадиалами.

На рис. 1 представлены зависимости дыхания корней и почвы от водного потенциала поверхностных гумусово-аккумулятивных горизонтов почвы. За 5 лет до начала замеров газообмена на латерально изолированных площадках лесной почвы  $0,5 \times 0,5 \text{ м}$  А.Г. Молчанов извлек корни растений из слоя 0–0,5 м. Сравнительные наблюдения за эмиссией  $CO_2$  из участков с извлеченными корнями и из нативной почвы позволили более или менее надежно выделить корневую составляющую дыхания. Почвенная засуха с водным потенциалом поверхностных слоев почвы  $< -5 \text{ МПа}$  дает нам возможность по результатам [8] оценить уровень эмиссии  $CO_2$ , когда прекращаются дыхание корней деревьев и трав, а также жизнедеятельность почвенных гетеротрофов в толще 0–5 м. Экстраполируя оценки интенсивности корневого дыхания (рис. 1, кривая 2) до полной его остановки при водном потенциале поверхностной почвы  $\psi_s = -7 \text{ МПа}$  [8, с. 220], мы видим, что эмиссия  $C$  из глубоких горизонтов и этом случае сохраняется на уровне  $\sim 1,7 \text{ мг CO}_2 \text{ дм}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ . В гипотетической ситуации полной

остановки работы корневых систем и листового аппарата, за 365 дней этот минимальный уровень эмиссии  $C(CO_2)$  обеспечит истечение из экосистемы  $4,1 \text{ т С га}^{-1} \text{ год}^{-1}$ . Если в течение типичных 120 дней вегетации  $NEP = -2,4 \text{ т С га}^{-1} \text{ год}^{-1}$ , то за остальные 245 дней года эмиссия  $C(CO_2)$  из глубоких слоев почвы на уровне  $4,1 \text{ т С га}^{-1} \text{ год}^{-1}$  добавляет  $2,7 \text{ т С га}^{-1} \text{ год}^{-1}$  [8]. В сумме средний многолетний эксцесс эмиссии  $C$  за пределы лесной экосистемы обусловит  $NEP = -5,1 \text{ т С га}^{-1} \text{ год}^{-1}$ . Такой же уровень эмиссии  $C(CO_2)$  мы ожидаем и для степных черноземов.

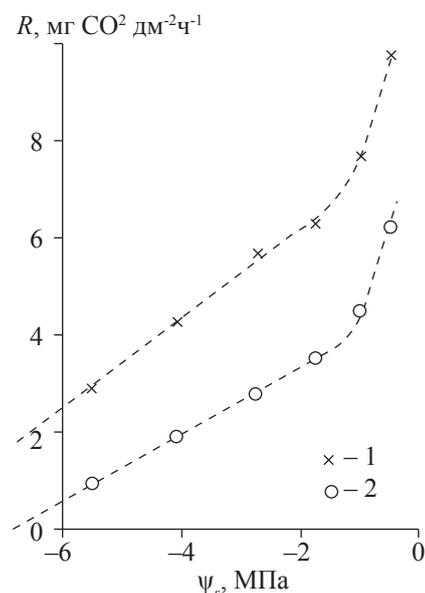


Рис. 1. Дыхание  $R$ , мг  $CO_2$  дм $^{-2}$  ч $^{-1}$ , почвы с удаленными из слоя 0–0,5 м корнями (1), и корней в слое почвы 0–0,5 м (2) в зависимости от водного потенциала поверхностных горизонтов почвы  $\psi_s$ , МПа

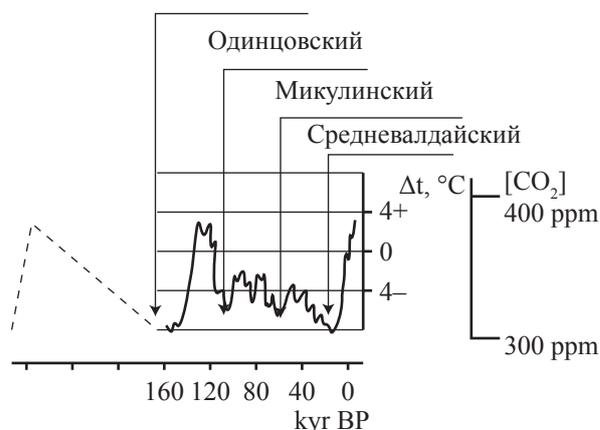


Рис. 2. Реконструкция изменений температуры приземного воздуха и концентрации  $CO_2$  после Днепровского оледенения (куг ВР, тыс. лет назад). По [8; 19]

Любая модель изменений концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере должна объяснять перемены в динамике темпов роста концентрации  $\text{C}(\text{CO}_2)$ , произошедшие за историческое время. Первое усиление эмиссии  $\text{CO}_2$ , приведшее к линейному накоплению  $\text{C}$  в атмосфере, приходится на 1860–1870-е гг. Второе изменение скорости эмиссии углекислоты отмечено после 1945–1950 гг.; годовая эмиссия основных углеродсодержащих газов  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  увеличилась в ~3,7 раза [14].

Хотя старт обогащения атмосферы  $\text{CO}_2$  совпадает с началом промышленной революции, однако даже на современном этапе развития промышленности, сельского хозяйства и транспорта, в XXI веке, роль антропогенной эмиссии не столь уж велика. По Г.А. Заварзину естественная эмиссия  $\text{C}(\text{CO}_2)$  в 8 раз превосходит антропогенные вклады [3].

Накопление  $\text{CO}_2$  в атмосфере можно связать с началом ускоренного разложения органического вещества в древних последнепровских почвах; на территории европейской России они залегают южнее пределов Московского оледенения, к югу от долины р. Оки. Достижение в «древних» почвах определенной пороговой концентрации ферментов, выделенных во вне бактериями [2, 16], послужило сигналом к ускоренному потреблению микроорганизмами запасов  $\text{C}$  гумуса и (или) к автокаталитическому разложению гумусовых веществ после 1860 г. Второй этап ускорения эмиссии углеродсодержащих газов, после 1945 г. [14], можно связать с образованием сплошных и полночленных ферментных комплексов или же (и) с начавшимся разрушением запасов  $\text{C}(\text{CaCO}_3)$  цианобактериями [7].

Ускорение ферментативного разложения почвенной органики стало результатом образования сплошных ферментных пленок на почвенных отдельностях (педах) [17]. Первый этап ускоренного выделения из почв  $\text{C}$ -содержащих газов, связан с появлением коллоидных пленок из наиболее распространенного экзогенного бактериального фермента – каталазы. Второй этап ускоренной эмиссии  $\text{CO}_2$  увязывается с пополнением гелевых пленок молекулами второстепенных ферментов (главные из которых гидролазы азота) [2]. Нельзя

исключать и начало после 1945 г. распада колоссальных запасов биогенного  $\text{CaCO}_3$ .

Об особых свойствах древних почв и роли бактериальных ферментов в формировании их экстраординарной активности еще в 1871 г. писал Petersen [5, с. 23–24; 20]. Литическая активность черноземов колоссальна. Поиски следов Куликовской битвы между реками Непрядвой и Доном, где были погребены тысячи убитых, не обнаружили никаких следов захоронений (с воинов снимали оружие и доспехи). При авиаразведке удалось зафиксировать только прямоугольные объекты-тени, могущие быть контурами братских могил. Некоторые историки в связи с этим выразили сомнение в самой реальности Куликовской битвы.

Запасы  $\text{C}$  (органического  $\text{C}$  и биогенного  $\text{C}(\text{CaCO}_3)$ ) по профилю 0–10 м темно-серых лесных почв превышают  $10^3 \text{ т С га}^{-1}$  [18]. Эмиссия  $\sim 5 \text{ т С га}^{-1} \text{ год}^{-1}$  из запасов, накопленных в лесных темно-серых почвах, черноземах и иных почвах, начавших свою историю после днепровского оледенения, может обеспечить наблюдаемый ныне подъем концентрации атмосферного  $\text{C}$ , но за счет одних только запасов почвенной органики в поверхностных слоях почвы такая скорость эмиссии  $\text{C}$  невозможна: она привела бы к исчерпанию запасов гумуса в почвах лесостепных водоразделов в течение 30–40 лет. Эмиссия  $5 \text{ т С га}^{-1} \text{ год}^{-1}$  осуществима только при условии деградации запасов  $\text{C}(\text{CaCO}_3)$ .

Современные сценарии изменений глобального климата описывают колебания температуры приземной атмосферы и концентрации  $\text{CO}_2$  как периодический процесс (рис. 2). Сверхдлинные реконструкции палеоклимата построены по данным о содержании изотопов, химических элементов и отдельных веществ в ядрах слоистых осадков и льдов из Антарктиды и Гренландии. К их однозначной факторной интерпретации необходимо относиться с определенной осторожностью. Очевидно, однако, что в течение плейстоцена оледенения следовали цугами с периодом 160–180 тыс. лет [19, 21]. Днепровское оледенение состояло из ряда уменьшавшихся оледенений, подобного ряду последующих:

Московское, Калининское, Осташковское. Эпизоды образования ледового покрова были разделены интерстадиалами – периодами потепления и распространения растительного покрова. После Днепровского времени наступил период интенсивнейшего связывания углерода в органическом веществе почв – Одинцовский интерстадиал. К концу Одинцовского периода запасы углерода в почвенном гумусе черноземов достигали оценочно  $1100 \text{ т С га}^{-1}$ . Сегодня мы пребываем во временном сайте, аналогичном преддверию Одинцовского межледниковья.

Площадь зоны распространения почв «домосковского» старта: серых лесных почв, черноземов и каштановых почв, – в России составляет  $\sim 0,23 \cdot 10^9$  га [9]. На Земле –  $\sim 0,8 \cdot 10^9$  га. При интенсивности эмиссии  $\text{C}(\text{CO}_2)$   $\sim 5 \text{ т С га}^{-1} \text{ год}^{-1}$  на 50 % площади распространения древних почв (считая, что остальная часть поверхности «черноземных областей» эродирована) мы получим суммарную эмиссию с их территории  $\text{C}(\text{CO}_2) \sim 2 \text{ Гт С год}^{-1}$

Эмиссия  $\text{C}(\text{CO}_2)$  древними почвами способна обеспечить обогащение атмосферы  $\text{CO}_2$  по  $\sim 1 \text{ ppm год}^{-1}$  ( $\sim 2,1 \text{ Гт С год}^{-1}$ ). За последние 50 лет средняя скорость роста концентрации атмосферного  $\text{C}(\text{CO}_2)$  –  $\sim 1,2 \text{ ppm год}^{-1}$  ( $\sim 2,5 \text{ Гт С год}^{-1}$ ) по данным обсерватории Мануа-Лоа [19]. По приполярным станциям мониторинга парниковых газов за последние 20 лет прирост концентрации  $\text{CO}_2$  составляет  $1,5 \text{ ppm год}^{-1}$  или  $3,1 \text{ Гт С год}^{-1}$  [4]. Таким образом, эмиссия газов, содержащих углерод, из древних почв и подпочвенных горизонтов выше уровня грунтовых вод вполне может служить одним из основных источников поступления С в атмосферу.

Работа выполнена в рамках гранта Президента РФ для государственной поддержки ведущей научной школы РФ НШ-6959.2010.4.

### Библиографический список

1. Глазовская, М.А. Роль и функции педосферы в геохимических циклах углерода / М.А. Глазовская // Почвоведение, 1996. – № 2. – С. 174–186.
2. Загуральская, Л.М. Динамика микробиологических параметров минерализации вещества в почвах сосновых лесов Карелии / Л.М. Загуральская // Лесоведение, 2000. – № 2. – С. 8–13.
3. Роль биоты в глобальных изменениях климата / Г.А. Заварзин // Физиология растений, 2001. – Т. 48. – № 2. – С. 306–313.
4. Израэль, Ю.А., Егоров В.И., Парамонов С.Г. Фоновое содержание диоксида углерода и метана в атмосфере северных районов Северного полушария и тенденции его изменения / Ю.А. Израэль, В.И. Егоров, С.Г. Парамонов // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем, 2007. – С. 9–22.
5. Костычев, П.А. Почвы черноземной области России, их происхождение и свойства / П.А. Костычев. – М.: Гос. изд-во сельскохозяйственной литературы, 1949. – 240 с.
6. Кривоуцкий, Д.А. Фауна орибатеид СССР и ее региональные особенности / Д.А. Кривоуцкий // Экология и фауна животных. – Тюмень, 1977.
7. Куприянова, Е.В. Возможное участие экзогенных карбонатов в цискальцификации алкалофильных цианобактерий / Е.В. Куприянова, М.В. Дудолодова, Н.В. Лебедева, А.Г. Маркелова и др. // Эмиссия и сток парниковых газов на территории северной Евразии. Тезисы докладов II Международной конференции. – Пушкино: Минпром науки и технологий РФ, 2003. – С. 68–70.
8. Баланс  $\text{CO}_2$  в экосистемах сосняков и дубрав в разных лесорастительных зонах / А.Г. Молчанов. – Тула: Гриф и К, 2007. – 284 с.
9. Орлов, Д.С. Органическое вещество почв Российской Федерации / Д.С. Орлов, О.Н. Бирюкова, Н.И. Суханова. – М.: Наука, 1996. – 256 с.
10. Романовская, А.А. Баланс почвенного углерода в водораздельных землях России / А.А. Романовская, Р.Т. Карабань // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем, 2007. – С. 58–74.
11. Романовская, А.А. Баланс углерода в пахотных почвах России / А.А. Романовская, В.Н. Смирнов, В.Н. Коротков, Р.Т. Карабань и др. // Конференция, посвященная 40-летию Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН «Биосферные функции почвенного покрова», г. Пушкино, 8–12 ноября 2010 г. – Пушкино: Synchronobook, 2010. – С. 259–261.
12. Романовский, М.Г. Продуктивность гетеротрофов и их роль в формировании NEP Теллермановского леса (южная лесостепь) / М.Г. Романовский // Вестник МГУЛ–Лесной вестник, 2010. – № 3 (72). – С. 35–46.
13. Соколов, Д.Ф. К вопросу о химической природе органических веществ почв под дубовыми лесами / Д.Ф. Соколов // Тр. Ин-та леса, 1953. – Т. 12. – С. 209–224.
14. Семенов, С.М. Глобальные и региональные климатические последствия некоторых программ стаби-

- лизации концентрации диоксида углерода и метана / С.М. Семенов, Ю.А. Израэль, Г.В. Груза, Э.Я. Ранькова // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем, 2007. – С. 9–22.
15. Федоров, В.Д. Экология / В.Д. Федоров, Т.Г. Гильманов. – М.: МГУ, 1980. – 464 с.
16. Федотов, Г.Н. Каталазная активность и почвенные гелевые структуры / Г.Н. Федотов, Е.И. Пахомов // Вестник МГУЛ–Лесной вестник, 2006. – № 2 (44). – С. 213–218.
17. Федотов, Г.Н. Исследование наноструктурной организации почвенных гелей / Г.Н. Федотов, В.С. Шалаев, В.И. Путляев, Д.М. Иткис // Вестник МГУЛ–Лесной вестник, 2010. – № 3 (72). – С. 212–222.
18. Экосистемы Теллермановского леса. – М.: Наука, 2004. – 340 с.
19. <http://www.esrl.noaa.gov/> – Official Mauna Loa internet resource, Hawaii, USA. 2009.
20. Petersen//DieLandwirtschaftlichenVersuchsstationen. 1871. Bd. XIII. S. 155.
21. Rodhe H., Charlson R., Crawford E. Svante Arrhenius and greenhouse effect // Ambio. 1997. Vol.26. N1. P.2–5.

## ПОЛИТЕННАЯ МОДЕЛЬ РАБОТЫ КАМБИЯ

М.Г. РОМАНОВСКИЙ, *гл. научн. сотр. Института лесоведения РАН, д-р биол. наук*

*root@ilan.ras.ru*

Поводом для развития модели политенных хромосом в инициалах камбия послужили многочисленные случаи дискретной изменчивости ширины годичных колец. Ширина годичного кольца древесины часто принимает только определенные значения. Иногда в одном годичном кольце на одном спиле отмечаются резкие изменения ширины в разных секторах. Ширина годичных колец тесно связана с числом клеток волокнистых элементов в радиальных рядах. Волокнистые элементы ксилемы у древесных пород в среднем имеют радиальный поперечник 14–18 мкм (рассеяннососудистые), 24–29 мкм (кольцесосудистые) и 30–40 мкм (сосновые). Годичное кольцо у хвойных и кольцесосудистых деревьев слагается порциями (квантами) по 16 радиальных клеток, а у рассеяннососудистых – по 8 клеток. Соответственно основной квант прироста, которому кратна ширина годичного кольца у хвойных 0,5–0,6 мм, у кольцесосудистых 0,4–0,5 мм, а у рассеяннососудистых пород 0,11–0,14 мм. Основной квант дополняют ± полу-кванты.

Радиальные ряды клеток, отчленяемых камбиальными инициалами наружу (флоэмные ряды) и внутрь ствола (ксилемные), удобнее всего наблюдать на хвойных породах, где они наиболее упорядочены. Классические схемы камбиальной зоны и зон дифференциации элементов флоэмы и ксилемы разработаны прежде всего для хвойных

[8 и мн. др.]. Ниже мы рассмотрим картину образования элементов ксилемы и флоэмы в основном на примере хвойных пород.

В стороны ксилемы и флоэмы от инициальных клеток камбия отходят радиальные ряды делящихся, а затем дифференцирующихся клеток. При этом флоэмный ряд производных клеток вдвое короче ксилемного. Вместе с камбиальными инициалами делящиеся клетки ксилемного и флоэмного рядов выделяют в камбиальную зону.

Ксилемный радиальный ряд, вытянутый от инициала к центру стебля, начинается четырьмя делящимися клетками. За ними следует зона дифференциации ксилемы (рис. 1).

Ростовая компонента дыхания состоит из 4-х импульсов, соответствующих 4-м ксилемным квантам, и 4-х (заштрихованы), – квантам новообразования клеток флоэмы.

Вне периода появления новых трахеид (I–II) максимумы  $R$  ( $a$  и  $b$ ) связаны заготовкой (сентябрь,  $b$ ) и востребованием (май,  $a$ ) зимних запасов пластических веществ.

В зоне дифференциации ксилемы клетки организованы в две более или менее однородные четверки: 4 радиально расширяющихся и 4 созревающих клетки [6, 8, 17, 18]. Четверка расширяющихся клеток преобразует свои размеры от плоских, сжатых в радиальном направлении, характерных для камбиальной зоны, до более или менее изодиаметрических. Достигнув формы, стандар-

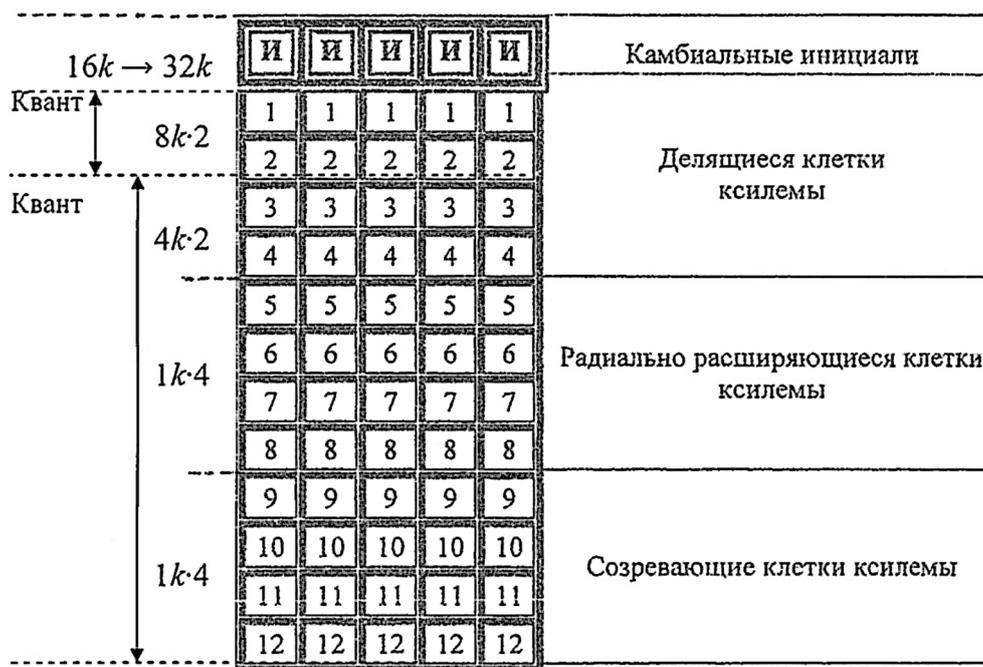


Рис. 1. Схема зон формирования радиального ряда трахеид, начиная от камбиальной инициали (И) до зоны созревания (клетки 9–12), на поперечном срезе стебля хвойного дерева (по [8])

тной для клеток зрелой ксилемы, они начинают «созревать» – наращивать вторичные клеточные оболочки, не подлежащие дальнейшему растяжению. На рис. 1 радиальные размеры всех клеток (И, 1–12) условно изображены одинаковыми.

Во флоэмных рядах мы обнаруживаем в камбиальной зоне только 2 делящиеся клетки. Зона дифференциации клеток флоэмного ряда представлена парой расширяющихся и парой созревающих клеток. Флоэмный ряд делящихся и дифференцирующихся клеток вдвое короче ксилемного ряда.

Политенная модель деления камбиальных инициалей голосеменных и кольцесосудистых покрытосеменных древесных пород выглядит следующим образом. Перед делением каждая хромосома обладает 32 копиями молекулы ДНК в виде 32 нитей – хромонем. Набор хромосом в диплоидной клетке принято обозначить как  $2n$ , а количество ДНК в клеточном хромосомном наборе как  $2c$ . При политении видимый набор хромосом камбиальной инициали  $2n$  содержит  $64n$  нити хромонем,  $64n$  молекул ДНК и  $64c$  (при условии, что  $c$  определено для однонитевого состояния хромосом гаплоида). Обозначив общее число хромосом (включая гомологические)  $k = 2n$ ,

мы можем записать для хвойных и кольцесосудистых, что число молекул ДНК в клетке –  $32k$ . У рассеяннососудистых пород –  $16k$ .

Наличие заготовленных копий ДНК позволяет производным политенной клетки делиться далее в автоматическом режиме, не заботясь об энергозатратном синтезе новых молекул. Деления сводятся к распределению загодя наработанных копий по хромосомам дочерних клеток [12].

После деления политенной инициали  $32k \rightarrow 16k + 16k$ , – дочерние клетки должны выбрать, какая (периферическая или внутренняя) останется камбиальной инициалью

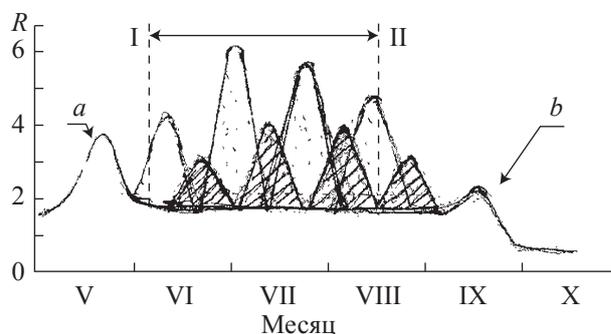


Рис. 2. Динамика стволового дыхания ( $R$ , мг  $\text{CO}_2$  дм<sup>-2</sup> ч<sup>-1</sup>) сосны обыкновенной в год, благоприятный для радиального прироста (по [5]): I–II – границы периода обнаружения новых клеток в радиальных рядах трахеид

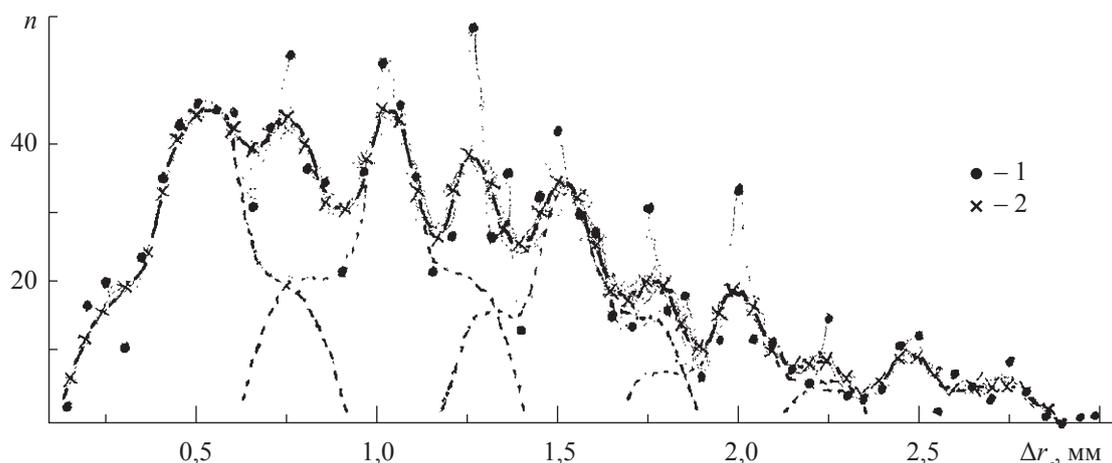


Рис. 3. Распределение ( $n$ ) годовых колец 40 деревьев *Pinus sylvestris* L. по величине прироста ранней древесины ( $\Delta r_e$ , мм). Частоты  $\Delta r_e$ : 1 – исходные измерения; 2 – сглаженные по 3. Пунктиром заданы распределения  $\Delta r_e$ , состоящие из  $16l$ -клеточных квантов ( $l = 1 \div 5$ ) с примыкающими полу-квантами  $16l \pm 8$  клеток

и станет наращивать копии хромомем от  $16k$  до  $32k$ . Вторая клетка пополнила делящиеся клетки камбиальной зоны ксилемного ряда, если она окажется внутренней, или флоэмного ряда, – если наружной. Вероятно, выбор происходит автоматически в режиме чередования: то внутренняя, то наружная клетка сохраняет статус камбиальной инициали.

Распределяясь по 16 дочерним диплоидным клеткам  $16k$ , комплект хромомем редуцируется до однополового  $1k \sim 2n$  в зоне дифференциации клеток ксилемы (рис. 1). Клетки флоэмных рядов переходят к дифференциации, обладая двухполовым  $2k \sim 2n$  комплектом молекул ДНК. Поэтому флоэмные ряды вдвое короче ксилемных.

Клетки 1 и 2 имеют по 8 хромомем на каждую хромосому. Клетки 3 и 4 – по 4 хромомемы. После деления клетки 4 ее производные  $2k$  и  $2k$  сразу же, минуя телофазу, приступают ко второму делению с образованием тетрады  $1k$  в зоне дифференциации ксилемы (клетки 5–8). Продукты предыдущего цуга делений (клетки 9–12) переходят в это время к созданию вторичных оболочек (рис. 1).

Квантовый характер динамики прироста ксилемы подтверждают наблюдения за «дыханием ствола». Эмиссия  $\text{CO}_2$  ствольной поверхностью идет волнами, согласованными с новообразованием клеток ксилемы [5]. Наибольших дыхательных затрат требует, вероятно, вызревание трахеид (утолщение их стенок до конечных размеров) [1, 2]. Выходу каждого

радиального ксилемного кванта соответствует подъем интенсивности ствольного дыхания. В годы, благоприятствующие приросту древесины, число импульсов больше; в годы угнетенного роста – меньше [5; 14, 15].

В промежутках между периодами формирования 16-клеточных квантов ксилемы, отмеченных импульсами усиления эмиссии  $\text{CO}_2$ , из ствола примерно каждые 20 дней камбиальные инициали начинают флоэмные 8-клеточные радиальные кванты. Дыхательные затраты на формирование флоэмного кванта меньше, чем ксилемного (оценочно на 50%), из-за отсутствия необходимости вторичного утолщения клеточных стенок (рис. 2).

У сенильных растений, а также в годы с неблагоприятными условиями вегетации и низким приростом, импульсивность ствольного дыхания в значительной мере утрачивается. В предельных случаях годичный прирост редуцирован до полу-кванта из 8 клеток.

Годовой прирост древесины строится из  $l$  радиальных квантов,  $16l$  клеток. Задержка в камбиальной зоне в конце вегетации клеток 3 и 4 (рис. 1), содержащих  $8k = (4k \cdot 2)$  копий набора ДНК, уменьшает величину прироста на «полу-квант» из 8 клеток. Использование полу-кванта, сохранившегося в камбиальной зоне от предыдущего периода роста, удлиняет ряд  $16l$  на 8 клеток. В результате наряду с основными группами  $16l$  возникают подгруппы  $16l \pm 8$  клеток.

У рассеяннососудистых пород образование подгрупп связано с дополнением основного кванта «полу-квантом» из 4-х клеток или с задержкой полу-кванта про запас. Годичные кольца у них формируются из  $8l \pm 4$  клеток.

Поскольку радиальный размер трахеид в течение сезона уменьшается (у сосны от 50–60 мкм до 10–20 мкм [1, 2, 16]), групповой характер изменчивости ширины годичного кольца не слишком очевиден. Однако, несмотря на сезонное варьирование радиальных размеров трахеид, распределение годичных колец хвойных по общей ширине ( $\Delta r$ ) сохраняет черты дискретности. В лесной зоне (Архангельская, Костромская, Вологодская, Московская области) для распределения ширины годичных колец сосны обыкновенной типичен основной максимум встречаемости при ширине  $\Delta r \sim 0,5$  мм, сопровождаемый слева ( $\Delta r \sim 0,25$  мм) более или менее выраженной модой «аварийных» или сенильных 8-клеточных приростов. За первым максимумом встречаемости  $\Delta r$  следует серия максимумов (обычно 3), имеющих близкую, или убывающую частоту и разделенных интервалами 500–560 мкм [15].

Яснее всего квантованность радиального прироста сосны обыкновенной видна на примере ширины зоны ранней древесины  $\Delta r_e$  в низкобонитетных древостоях (рис. 3).

Радиальный размер трахеид  $d$  уменьшается в течение сезона. Ранние и поздние трахеиды разделяет рубеж  $d \approx 31$  мкм [1, 2, 14; 15, 16]. В условиях I–II классов бонитета максимальный  $d$  ранних трахеид превышает 60 мкм, но в насаждениях низших классов бонитета варьирование  $d$  ограничено  $30 \leq d \leq 32$  мкм. Это позволяет увидеть групповую изменчивость  $\Delta r_e$  сосны достаточно четко. На рис. 3 представлено распределение ширины слоев ранней древесины на поперечных спилах 40 деревьев из низкопроизводительного багульниково-сфагнового сосняка V-класса бонитета (Московская область). Данные относятся к одному периоду онтогенеза, представляя последние 30 лет жизни одновозрастного 140-летнего насаждения, когда возрастными изменениями  $\Delta r_e$  и  $d$  можно пренебречь [9, 20].

В ряду модальных значений  $\Delta r_e$  расстояние между соседними модами 500–520 мкм. Кванты камбиальных производных, слагающие радиальные ряды трахеид ранней зоны годичного кольца сосны, суммируются по 16 клеток с радиальным размером  $31 \div 32$  мкм. Дополнительные максимумы через 250–260 мкм появляются за счет сложения частот в подгруппах из  $\pm 8$  клеток смежных 16-клеточных групп (рис. 3),

Политения присуща хромосомам не одних только камбиальных инициалей, но, вероятно, всем меристематическим тканям. Меристематические клетки – родоначальники клеточных клонов требуют особой охраны для поддержания стабильности генома, стабильности формы и функционального устройства дочерних клеток и многоклеточных структур. Политения – способ защиты генома от давления мутаций. Политения – механизм дифференциации жизненного пути производных клеток.

Каждая хромосома гаплоидного генома яйцеклеток хвойных обладает 32 копиями ДНК [3, 4]. Истинная женская гамета у хвойных появляется в процессе редукции оплодотворенного материнского гаплотипа до одноклеточного состояния, после серии делений и образования 16 клеток подвески (будущей пуповины зародыша). Четыре тэтрады клеток подвески выстроены в линейную структуру [19], в которой копияность гаплоидного материнского генома снижается от 16 хромосом в клетках «розетки» до  $1k$  в последней тэтраде:  $4(4k)$ ;  $4(2k)$ ;  $4(1k)$ ;  $4(1k)$ . Уровни копияности ДНК в материнском гаплотипе редуцируются до  $1n(1k)$  набора. Клетки последней тэтрады подвески зародышей у сосны обыкновенной не связаны между собой плазмодесменными тяжами и дают основания четырем нитям, увенчанным эмбриональными массами, четырем кливажным эмбрионам. (Параллельно из других оплодотворенных архегониев в семязпочке могут развиваться и конкурировать в зародышевой камере другие гетероэмбрионы от 0 до 3). В эмбриональной структуре, продуцируемой одним архегонием, отцовский  $1n$  гаплотип включается в ядро лишь одной из 4-х клеток дистальной тэтрады подвески. Отцовский набор хромосом достается только одному эмбриону из 4, венчающих 4

нити подвески [13]. Завершается сингамия, возникает зигота  $2n$ , дающая начало лидирующему диплоидному зародышу. Остальные три зародышевые массы гаплоидны. В редких случаях (десятые доли процента) один из гаплоидных зародышей сосны обыкновенной развивается в малорослый проросток – «сиамский» близнец нормального диплоидного всхода [7].

У ели, у которой нет расщепленной полиэмбрионии, суспензор завершается одним диплоидным эмбрионом, расположенным немного ассиметрично относительно оси удлинения клеточных тетрад подвески [19].

Родоначальные женские клетки зародышевого ряда (археспоры) синтезируют еще более политенные копии генома. При образовании макрогаметофита дробления материнской клетки на ценоцитной стадии развития гаплоидного эндосперма порождают около 2000 голых ядер. Среди дочерних клеток археспоры хвойных только одна, имеющая политенный  $32k$  набор молекул ДНК [3, 4], выделяется как яйцеклетка с  $1n$  хромосомным геномом женской «гаметы».

Яйцеклетки рассеяннососудистых пород, так же как их камбиальные инициалы, имеют, предположительно,  $16k$  молекул ДНК. Это определяет большую, в сравнении с хвойными и кольцесосудистыми породами, эволюционную пластичность рассеяннососудистых деревьев и кустарников. Скорость видообразования возрастает; современное число девесно-кустарниковых рассеяннососудистых видов на порядок больше, чем хвойных.

Начало эмбриогенеза у покрытосеменных деревьев, по-видимому, столь же сложно, как у голосеменных. Если политенная плоидность «гамет» лиственных пород подобна плоидности их камбиальных инициалей, можно ожидать, что у кольцесосудистых пород оплодотворение проходит по типу  $32n + 1n$ , а у рассеяннососудистых –  $16n + 1n$ .

Мужской гаметофит хвойных, так же как женский, развивается на фоне редукции политенной копии генома от  $128k$  у микроспороцита до  $1k$  у спермиев. Последовательные деления микроспоры  $32k$  (одна из 4 производных клеток микроспороцита) отчленивают две отмирающие, проталлиальные клетки  $16k$  и  $8k$ . Ядро третьей  $8k$  клетки делит-

ся еще раз на генеративную (антеридиальную) и вегетативную (сифоногенную) клетки  $4k$  и  $4k$ . После прорастания пыльцевой трубки в нуцеллус семязпочки, вегетативное ядро  $4k$  выходит в пыльцевую трубку, движется в сторону архегониев, и в конце концов тоже деградирует, а генеративное ядро еще раз делится с образованием базальной  $2k$  и стебельковой  $2k$  клеток. Стебельковая клетка  $2k$  перемещается в пыльцевую трубку, где теряет цитоплазму и деградирует. Базальная клетка делится на два спермия –  $1k$  и  $1k$ , устремляющихся к дистальному концу пыльцевой трубки, чтобы участвовать в оплодотворении.

Политения хромосом не чужда и верхушечным меристемам почек. Апексы верхушечных меристем могут покоиться, почти не делясь, именно в силу политении своих хромосом, уже заготовивших копии ДНК для последующего цикла роста побега.

Световой дифференциации мезофилла у лиственных пород сопутствует «вторичная» политения. Клетки губчатой паренхимы и слоев палисадной паренхимы листа образуют хромосомы с 1, 2, 4-мя молекулами ДНК в политенных хромосомах диплоидного набора [11; 21]. Кратность копирования возрастает параллельно росту освещенности клеточного слоя и увеличению вероятности мутаций под действием коротковолновых компонент светового потока [12]. Судя по изменчивости светового плато фотосинтеза и поверхностной плотности листовых пластинок, некоторые деревья образуют клетки палисадной паренхимы с 16 копийным политенным геномом [15]. Некоторые же вообще не способны синтезировать политенные хромосомы и при высокой освещенности выживают лишь под пологом господствующего древостоя. При образовании устьичного аппарата автоматизм митозов заставляет также предполагать светоиндуцируемую политению хромосом в ядрах клеток листового эпидермиса [12].

Д. Мэзия цитирует работу Т. Iwamura, еще в 1955 г. показавшего существование у хлореллы крупных «световых» политенных клеток, способных делиться 4 раза подряд без синтеза ДНК. В результате формируется 16 «темновых» хлорелл [12, с.63].

У животных политения, по-видимому, не менее распространена и не менее значима, чем у растений [12]. Достаточно упомянуть излюбленный объект цитогенетики – гигантские хромосомы в клетках слюнных желез чешуекрылых. Судя по различиям размеров клеток и автоматизму первых дроблений и клеточных дифференциаций оплодотворенной яйцеклетки, эмбриогенез позвоночных протекает с участием политения материнского генома. До 16-го дробления клетки сохраняют тотипотентность, в дальнейшем утрачиваемую [10].

Воспроизведение молекул ДНК – основная задача деления клеток – можно сказать, что это вообще основная задача жизни почти во всех ее проявлениях. Пред делением (митозом или мейозом) хроматиды, соответствующие одной гигантской спирализованной молекуле ДНК, сцепленной с сопутствующими белками – гистонами, синтезируют на матрице собственной исходной молекулы копии ДНК. В меристематических клетках-инициалах синтезируется множество политенных копий ДНК (в разных хромосомах – одинаковое число). Политения – средство защиты яйцеклеток, меристем и фотосинтезирующих клеток от давления мутаций. Последовательности нуклеотидов в одной или нескольких нитях ДНК при несоответствии стандарту можно скорректировать согласно преобладающему варианту. Поделившиеся клетки с разным уровнем политения обретают разную судьбу.

Работа выполнена в рамках гранта Президента РФ для государственной поддержки ведущей научной школы РФ НШ-6959.2010.4

### Библиографический список

1. Антонова, Г.Ф. Рост клеток хвойных / Г.Ф. Антонова. – Новосибирск: Наука, 1999. – 232 с.
2. Астраханцева, Н.В. Зависимость дыхания ствола сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) от анатомического строения и развития тканей флоэмы и ксилемы: автореф. ... дисс. канд. биол. наук 03.00.05 и 03.00.16 / Н.В. Астраханцева – Красноярск, 2009. – 19 с.
3. Баранцева, Л.М. Цитофизиологический анализ развития архегония *Pinus sibirica* Du Tour.: автореф. дисс. ... канд. биол. наук / Л.М. Баранцева. – М.: МГУ, 1992. – 21 с.
4. Ермаков, И.П. Содержание ДНК в яйцеклетке *Pinus sibirica* Du Tour. на разных стадиях ее развития / И.П. Ермаков, Н.П. Матвеева, Л.М. Баранцева // Докл. АН СССР, 1980. – Т. 251. – № 1. – С. 254–256.
5. Забуга, Г.А. Дыхательный газообмен CO<sub>2</sub> растущего ствола сосны обыкновенной: Автореф. дисс. ... канд. биол. наук 03.00.12 / Г.А. Забуга. – Иркутск: Сиб. ИФиБР СО АН СССР, 1985. – 18 с.
6. Иванов, Л.А. Анатомия растений / Л.А. Иванов. – Л.: Гослестехиздат, 1939. – 264 с.
7. Исаков, Ю.Н. Обнаружение спонтанных гаплоидов у сосны обыкновенной и перспективы их использования в лесной генетике и селекции / Ю.Н. Исаков, А.К. Буторина, Л.С. Мурая // Генетика, 1981. – Т. 14. – № 4. – С. 701–707.
8. Коровин, В.В. Строение стебля древесных растений при аномальном росте: учеб. пос. / В.В. Коровин, Г.А. Курносов. – М.: МГУЛ, 2004. – 194 с.
9. Ловелиус, Н.В. Дендроиндикация / Н.В. Ловелиус. – С-Пб: Петровская акад. наук и искусств, 2000. – 313 с.
10. Мазунин, И.О. Митохондрии: жизнь в клетке и ее последствия / И.О. Мазунин, Н.В. Володько // Природа, 2010. – № 10. – С. 3–14.
11. Мокроносов, А.Т. Фотосинтетическая функция и целостность растительного организма. (42-е Тимирязевское чтение) / А.Т. Мокроносов. – М.: Наука, 1983. – 64 с.
12. Мэзия, Д. Митоз и физиология клеточного деления, пер. с англ. / Д. Мэзия. – М.: Иностранная лит-ра, 1963. – 430 с.
13. Романовский, М.Г. Гаметогенез и эмбриогенез сосны обыкновенной. Гипотезы и мифы / М.Г. Романовский // Научные труды МГУЛ, 1999. – Вып.297. – С. 23–28.
14. Романовский, М.Г. Формирование годичного кольца древесины и дыхание ствола у сосны и дуба / М.Г. Романовский, В.В. Коровин, Д.Е. Румянцев // Вестник МГУЛ–Лесной вестник, 2009. – № 1 (64). – С. 34–38.
15. Романовский, М.Г. Система вида у лесных деревьев / М.Г. Романовский, Р.В. Щекалев. – СПб, 2011.
16. Шипицына, Е.Ю. Оптимизационное моделирование радиального прироста ствола хвойных: автореф. дисс. ... канд. биол. наук / Е.Ю. Шипицына – Красноярск: СибГТУ, 2007. – 22 с.
17. Bailey I.W. Phenomen of cell division in the cambium of arborescent gymnosperms and their cytological significance // Proc. Nat. Acad. Sci. 1919. V. 5. P. 8.
18. Bailey I.W. The increase in girth of the cambium // Amer. Journ. Bot. Vol. 10. 1923. P.
19. Dogra P.G. Seed sterility and disturbances in embryogeny in Conifers with particular reference to seed testing and tree breeding in Pinaceae // Studia Forestalia Suecica. 1967. Nr 45. 95 p.
20. Frits H.C. The tree rings and climate. London, New York, San Fransisco, 1976. 567 p.
21. Maksymowich R. Analysis of leaf development. Cambridge: Univ. press, 1973. 109 p.

## ДИНАМИКА АКТИВНОСТИ ПОГЛОЩАЮЩИХ КОРНЕЙ ДУБА

М.Г. РОМАНОВСКИЙ, *гл. научн. сотр. Института лесоведения РАН, д-р биол. наук*

В.В. МАМАЕВ, *ст. науч. сотр. Института лесоведения РАН, канд. биол. наук*

*root@ilan.ras.ru*

В статье мы рассмотрим два проявления активности поглощающих корней у кольцесосудистой древесной породы – дуба черешчатого: сезонную динамику прироста и динамику дыхания, связанную с поглощением влаги из почвы.

Мониторинг загрузки почвы тонкими (< 1мм) корнями дуба черешчатого, несущими микоризные окончания, в южной лесостепи в годы с нормальным и недостаточным увлажнением позволял нам выделять вновь образованные поглощающие корни и оценивать их биомассу, равную в этих условиях приросту [17]. Исследования корневых систем дуба проведены на постоянных пробных площадях в приспевающих нагорных и пойменных дубравах Теллермановского опытного лесничества ИЛАН, расположенного на границе лесостепи и степи. Начиная с 1985 г. почвенные монолиты регулярно извлекали и разбирали, определяя сухую массу новообразованных поглощающих корней. Дыхание корней и водный потенциал почвы измеряли в вегетационных сосудах у сеянцев, при периодическом поливе и иссушении почвы [12]. Повторный анализ этих исследований обнаружил интересные, не выявленные ранее особенности активности корневых систем дуба черешчатого в связи с поглощением почвенной влаги.

Функции поглощения почвенных растворов лежат на тонких корневых окончаниях диаметром менее 0.1 мм, имеющих фантастическую суммарную длину – сотни километров на 1 м<sup>2</sup> поверхности почвы [2]. В лесостепных дубравах на темносерых лесных почвах поглощающие корни древесных растений микоризированы. У дуба микоризы корневых окончаний в гумусовом горизонте почвы эктотрофны. Чехлы микориз в слое почвы 0–50 см покрывают поглощающие корни дуба в 85–100 % случаев. Обычно, при типичных гидротермических условиях, обра-

зование новых микоризных корней проходит в очень сжатые сроки. Ростковая активность поглощающих корней дуба в «пахотном горизонте» почвы в относительно сухие годы начинается и заканчивается одновременно (с точностью до нескольких часов) во всех типах дубрав (рис. 1). При напряженных гидротермических условиях, типичных для южной лесостепи, синхронный импульс ростовой активности корней резко сменяется периодом покоя, во время которого молодые корни постепенно пробковеют [5, 6, 17]. Похожую картину ритмичного нарастания сосущих корней дуба в течение сезона наблюдали А.Ф. Тюлин и К.Г. Щербина, работавшие в тех же древостоях Теллермановского опытного лесничества ИЛАН, что и мы, еще в начале 50-х гг. прошлого столетия при изучении биологического круговорота азота и фосфора в системе растительность – почва [16].

Прирост поглощающих корней ( $\text{г м}^{-2}$ ) рассчитан для гумусо-аккумулятивного горизонта почвы, мощность горизонта:  $A$  и  $B - 0,5$  м,  $B - 0,1$  м.

Синхронность новообразования корней особенно интересна в связи с тем, что дубравы пойменного (кроме конусов выноса осадков из балок) и нагорного ландшафтов (кроме бровки нагорного плато) заселены разными формами (расами) дуба черешчатого. Пойменные и солонцовые дубравы Теллермановской рощи занимает, почти исключительно, ранораспускающаяся (ранняя) форма *Quercus robur* L. var *praecox* Czern., а водораздельные на темносерых лесных почвах позднеораспускающаяся (поздняя) *Q. robur* var *tardiflora* Czern.. Поздняя форма дуба, более пригодная для кораблестроения, была интродуцирована на водоразделах рек Донского бассейна. В Слободской Украине (на землях Войска Донского и в Харьковской губернии) поздний дуб называли Петровским [15]. Однако, несмотря на различия феноло-

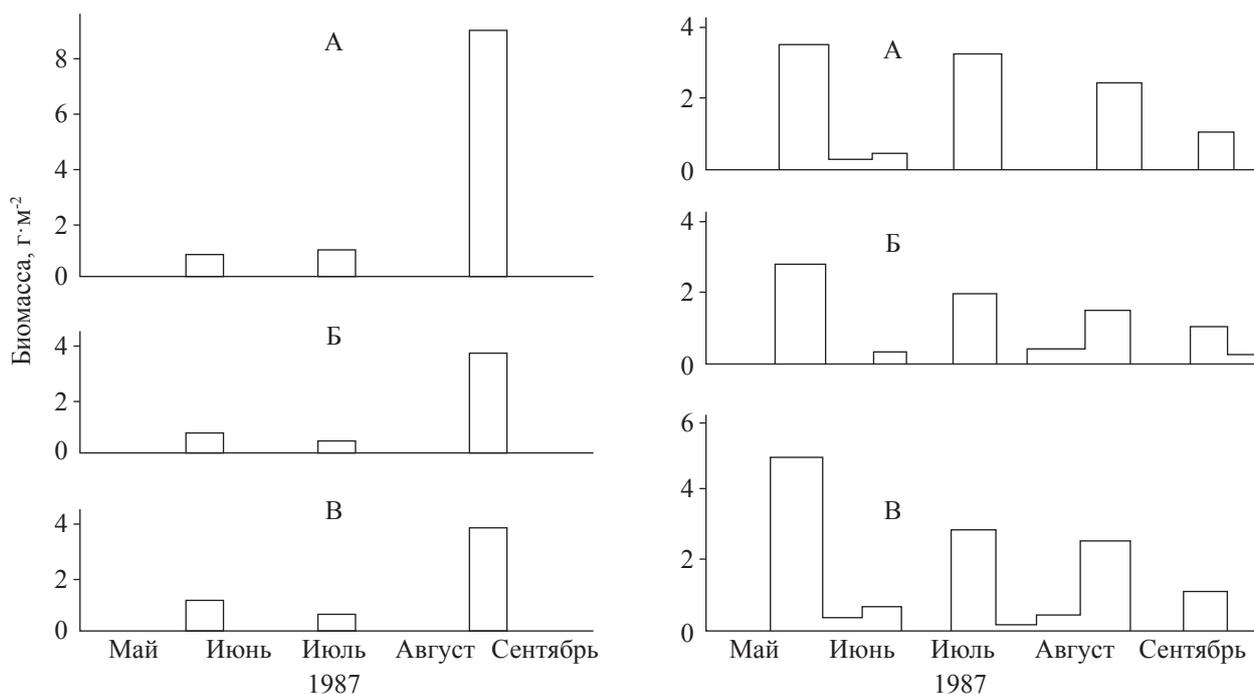


Рис. 1. Сезонные изменения биомассы молодых поглощающих корней дуба (приросты,  $\text{г}\cdot\text{м}^{-2}$ ) при среднем количестве атмосферных осадков (1987 г.) и при повышенном количестве осадков (1997 г.) в снытево-осоковой А, солонцовой Б и пойменной В дубравах [5, 6]

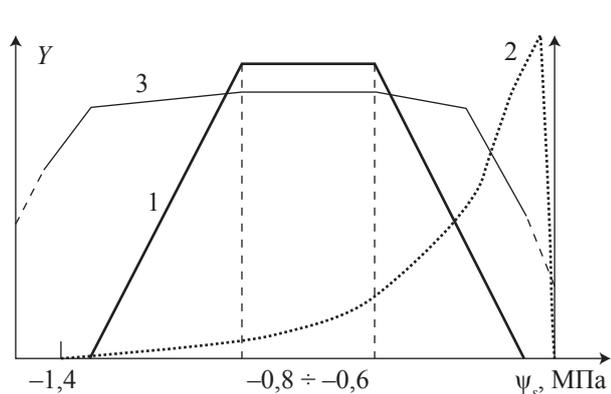


Рис. 2. Модель изменений параметров активности поглощающей части корневых систем дуба ( $Y$ ) в зависимости от среднего за полтора месяца водного потенциала корнеобитаемого слоя почвы ( $\psi_s$ , МПа). Параметры  $Y$ : 1 – прирост биомассы поглощающих корней; 2 – интенсивность поглощения влаги и дыхания корневой системы растения; 3 – нагрузка почвы поглощающими корнями (запас)

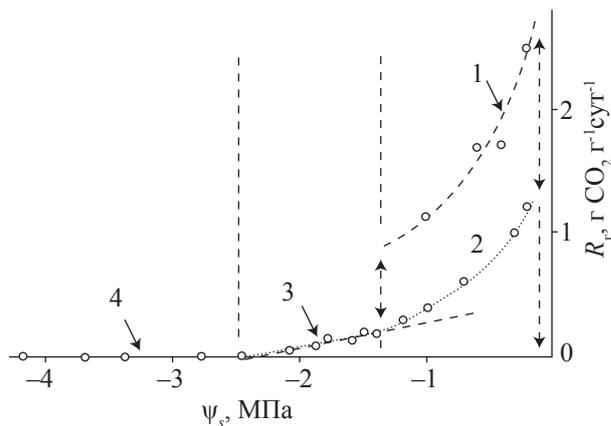


Рис. 3. Динамика корневого дыхания семян дуба в вегетационных сосудах ( $R_p$ ,  $\text{г}\cdot\text{CO}_2\cdot\text{г}^{-1}\cdot\text{сут}^{-1}$ ) в зависимости от водного потенциала почвы ( $\psi_s$ , МПа) при ее периодическом поливе и высыхании (циклы 1–4 и 2–4). По [7, 12]: 1, 2 – дыхание при активном поглощении корнями влаги из почвы (1 – интенсивное, 2 – нормальное); 3 – дыхание симбиотрофов на фоне остановки поглощения корнями влаги; 4 – отсутствие дыхания в состоянии анабиоза почвенной биоты

гии и вероятные различия географического происхождения, поглощающие корни ранних и поздних дубов, исключая единичные вкрапления в массивы с господством противоположной формы, ведут себя одинаково.

При этом общая архитектоника корневых систем у ранней и поздней форм дуба отличается. Корни ранней формы в пойме не идут глубже 3–4 м. В нагорных дубравах глубокие корни позднего дуба опускаются на

10 м до капиллярной каймы грунтовых вод. Благодаря глубоким ярусам корневых систем древесных растений почва суглинистых водоразделов лесостепной зоны, как единое биокосное тело, вовлеченное в углеродный цикл, простирается гораздо глубже, чем это принято представлять.

В нагорных дубравах под усохшими деревьями обнаружены мощные кальцинированные прослойки, свидетельствующие об усиленном поглощении воды во время засух с глубины ~4 м (сообщение С.В. Егоровой). Корни усохших деревьев не сумели пробиться глубже, до грунтовых вод. В пойменных дубравах усохшие деревья имели укороченные вертикальные корни, а основной вододерживающий гумусированный и оглеенный пласт, подстилаемый песками, был под ними на 40 % тоньше, чем под выжившими деревьями. В годы засух усохшие деревья испытывали острый водный дефицит, что повлекло возникновение очагов листогрызущих насекомых и, в конечном итоге, усыхание.

Периоды активации и остановки роста поглощающих микоризированных корней не связаны напрямую с дефицитом почвенной влаги. Динамика корневой активности регулируется сигнальными взаимодействиями в симбиотрофическом комплексе (один из возможных агентов – этилен), но инициируют ростовую активность, вероятно, внешние, «космические» сигналы, общие для всех деревьев [11]. Внутрисезонные импульсы новообразования микоризной массы поглощающих корней дуба черешчатого отражают какие-то примитивные общие черты, присущие виду *Quercus robur* L., а возможно, и другим видам. Влияние влагообеспеченности – главного лимитирующего фактора в лесостепи, прослеживается только в многолетней динамике, при анализе обобщенных данных о годичных приростах корневой массы и суммах осадков за вегетационный период.

Молодое поколение корней фиксируется по светлому окрасу и прозрачности микориз [5, 6]. В годы импульсного синхронного корнеобразования нетрудно определить сезонный и годичный прирост, опад поглощающих корней и массу ежегодно возвращаемо-

го в почву органического вещества в режиме реального времени в расчете на площадь всего древостоя. Однако импульсивный рост микоризных корней дуба отмечается только до тех пор, пока сумма атмосферных осадков за вегетационный период близка к многолетней норме или ниже нее.

В последние годы на фоне резкого изменения метеоусловий с общей тенденцией к усилению атмосферного увлажнения летом [13] синхронность новообразования и роста микориз в лесостепи нарушается. В 2009 г., например, импульсивность новообразования микориз отсутствовала, ростовая активность корней пришлась на начальный период вегетации. Размеры микориз увеличились как минимум в 2–3 раза, в основном за счет их удлинения. Ростовые процессы все чаще приобретают признаки непрерывности, присущие более умеренным лесорастительным зонам. В годы повышенного количества осадков (~15 % лет) определить суммарный прирост поглощающих корней методом почвенных монолитов не удастся. Этапы ростового покоя, которые можно использовать как отправные точки отсчета нарастающей массы микоризных корней, не прослеживаются.

Обычно первые признаки пробуждения корней в «пахотном горизонте» почвы отмечаются в мае. Иногда, после мягких зим и раннего таяния снега, – в конце марта и первой половины апреля. Зачастую новообразование и отмирание тонких корней наблюдается осенью. В течение вегетационного периода проходит до четырех пиков роста микоризированных корней (рис. 1). Импульсы новообразования корней не привязаны к строго определенным фазам вегетации или месяцам года. На единице площади дубрава поддерживается необходимое число поглощающих корней, способных к активному поглощению почвенной влаги (рис. 2, кривая 3) [5, 6, 13, 17].

При водном потенциале поверхностных слоев почвы от  $\psi_s = -0,1$  до  $-1,3$  МПа (рис. 2, кривая 2) прирост биомассы поглощающих корней приближенно характеризуется параболической функцией  $\psi_s$  с максимумом при  $\psi_s = -0,6 \div -0,8$  МПа. В области  $\psi_s < -0,8$  МПа

прирост поглощающих корней уменьшается, так как объемы доступной влаги сокращаются, а рост общего запаса корней уже не улучшит водообеспечения растений. В области  $\psi_s > -0,6$  МПа новообразование поглощающих корней также падает, потому что даже невысокая плотность поглощающих корней обеспечивает поступление в растения достаточных количеств влаги (рис. 2, кривая 1).

При избытке почвенной влаги  $\psi_s > -0,2$  МПа интенсивность суммарного дыхания корневой системы резко упадет (рис. 2, кривая 2). При длительном избыточном увлажнении сократится также число (плотность,  $m^{-2}$ ) поглощающих корней (рис. 2, кривая 3).

Норма осадков в южной лесостепи соответствует границе гумидной и аридной растительных зон. Отклонения от нормы вызывают сбои синхронности появления и развития микориз, усиливают пространственную изменчивость ростовой активности поглощающих корней дуба [13]. В экстремально сухие годы новообразование микориз в поверхностных горизонтах почвы приостанавливается; поглощающие корни образуются только в глубоких горизонтах почвы, где они находятся в более влажной среде. При превышении нормы осадков новообразование поглощающих корней утрачивает импульсность и становится практически непрерывным, как в более северных и влажных регионах.

Поглощение почвенной влаги связано с энергетическими (дыхательными) затратами на сократительные движения плазмодесм. Отсутствие доступной почвенной влаги и отсутствие работы для корней, поглощающих воду из почвы, сокращает дыхательные затраты корневых систем. В опыте, организованном А.Г. Молчановым, почва в вегетационных сосудах высыхала без полива до  $\psi_s = -2 \div -3,7$  МПа. Сеянцы дуба постепенно уменьшали корневое дыхание (рис. 3.), параллельно снижалась интенсивность фотосинтеза и транспирации листы. Полив вызывал всплеск корневого дыхания, фотосинтеза и транспирации [7, 12]. На легких почвах аналогичные реакции на исчерпание почвенной влаги и последующий полив описаны у со-

сны [9]. Отметим, что ствольное дыхание в ответ на иссушение верхних корненасыщенных слоев почвы, наоборот, возрастает до  $\psi_s = -2$  МПа; и только при  $\psi_s < -2$  МПа также начинает падать [7].

При высыхании почвы в вегетационных сосудах от  $\psi_s = 0$  до  $-1,4$  МПа корни сеянцев дуба продолжают закачивать воду в проводящие цилиндры, сокращая интенсивность дыхания экспоненциально. На интервале  $\psi_s = -1,4 \div -2,4$  МПа плазмодесменные насосы останавливаются, и интенсивность дыхания падает уже по-иному, как линейная функция  $\psi_s$ . Возможно, линейное сокращение интенсивности дыхания поглощающих корней дуба при  $\psi_s = -1,4 \div -2,4$  МПа связано с остаточной активностью их симбиотического микоризного компонента.

При  $\psi_s \leq -2,4$  МПа корни переходят в состояние анабиоза [9, 12]. В таком состоянии, при  $\psi_s = -3 \div -6$  МПа, поглощающие корни сосны сохраняют жизнеспособность в течение 1–2 месяцев. Водный потенциал самих поглощающих корней опускается при этом до  $\psi_R = -5 \div -9$  МПа [9, с. 151, 179].

В диапазоне  $\psi_s = -0,2 \div -1,4$  МПа интенсивность дыхания и ритм сократительных движений плазмодесм эндодермы поглощающих корней имеют два рабочих режима (рис. 3, кривые 1 и 2). После второго цикла высыхания и полива почвы в вегетационных сосудах [12] корни перешли к более интенсивному дыханию (рис. 3, режим 1), стремясь ускоренно восстановить оводненность иссушенных тканей.

Двухуровневое варьирование корневого дыхания обнаружено также у *Cucurbita pepo* L. по поглощению  $O_2$  при гидропонике [4]. Смена питательного раствора на свежий (постоянное освещение) вызывала падение дыхания корней от  $\sim 1,9$  до  $\sim 1,3$  мл  $O_2$   $ч^{-1}$  в расчете на одно растение. Затемнение и добавка донорского корневого раствора восстанавливали интенсивность поглощения кислорода  $\sim 1,9$  мл  $O_2$  особь $^{-1}$   $ч^{-1}$ . Вероятно, интенсивность дыхания и ритм сократительных движений плазмодесм эндодермы при поглощении корнями влаги регулируются гормонально.

М.К. Сапанов выделил два сезонных этапа водного питания древесных растений в аридных условиях [14]. Весной, в начале лета (1) за счет весеннего влагозапаса, накопленного верхними горизонтами суглинистой почвы и во второй половине вегетации (2) за счет интенсивного потребления грунтовых вод (ГВ). До исчерпания весенних запасов воды в поверхностных горизонтах крупные сосуды якорных корней закрыты, или работают также как мелкие, потребление ГВ идет в минимальном объеме. Только после нарастания градиентов  $\psi$  до  $\Delta\psi > 0.1$  МПа м<sup>-1</sup> якорные корни начинают усиленный водозабор ГВ. Скорость нагнетания почвенной влаги в поглощающие корни глубоких ярусов увеличивается синхронно со скачкообразным ростом тока пасоки по якорным корням (режим 2 на рис. 3 сменяется на режим 1).

Сказанное касается аридных и семиаридных регионов. Активная закачка почвенных растворов внутрь проводящего цилиндра поглощающего корня может прекращаться в диапазоне  $-0,2 \geq \psi_s \leq 0$  МПа. Во влажной почве поглощение влаги осуществимо без дыхательных затрат осмотическим путем по градиентам водного потенциала корней. Весной поглощение влаги путем активной ее закачки в проводящий цилиндр не может начаться раньше прогрева почвы до 6–8 °С (температура «отверзания» плазмодесменных каналов) [8, с. 91]. В Теллермановской роще под пологом леса (7 квартал) температуры почвы  $\geq 7$  °С на глубине 5 см устанавливаются с середины апреля. На глубине 40 см уверенный переход среднесуточных температур почвы выше 7 °С наступает в середине мая [10].

В таежных лесах лишь в редкие годы экстремальной засухи корни деревьев не способны извлечь из почвы влагу [1, 9]. Несмотря на высокие значения водного потенциала тонких корней  $\psi_R$ , в большинстве случаев  $\psi_S \geq \psi_R$ . Почвенные растворы поступают в корни и без помощи плазмодесменных насосов. Так, по В.И. Абражко у ели в Тверской области  $\psi_R = -0,4$  МПа; по Л.К. Кайбияйнену и Т.А. Сазоновой  $\psi_R$  у сосны в Карелии слабо варьирует и его можно считать постоянным:  $\psi_R = -0,32$  МПа [1, 3].

Жизнь поглощающих корней подчинена законам, восходящим к ранним этапам эволюции наземных растений. Механизм работы поглощающих корней деревьев относится к филогенетически древнейшим и мало варьирует. Возможно, закачка воды посредством сократительных движений плазмодесм – пережиток существования предков сосудистых растений в мелких водах высокой солености, когда из гипертонического раствора влагу для обеспечения надводных частей растения можно было поглотить только посредством активного нагнетания опресненной воды через непроницаемые мембраны. В этих же условиях сформировался слой клеток эндодермы с поясками Каспари, блокирующий осмотические потери пресной воды во внешнюю среду.

Работа выполнена в рамках гранта Президента РФ для государственной поддержки ведущей научной школы РФ НШ-6959.2010.4

#### Библиографический список

1. Абражко, В.И. Водный режим сообществ еловых лесов: автореф. дисс. ... д-р биол. наук 03.00.05. / В.И. Абражко – СПб: БИН им. В.Л. Комарова РАН, 1998. – 46 с.
2. Елагин, И.Н., Мина В.Н. Строение корневых систем дуба на темно-серых лесных почвах и солонцах / И.Н. Елагин, В.Н. Мина // Тр. Института леса АН СССР, 1953. – Т. 12. – С. 151–170.
3. Кайбияйнен, Л.К. Динамика водного обмена сосны / Л.К. Кайбияйнен, Т.А. Сазонова // Эколого-физиологические исследования фотосинтеза и водного режима растений в полевых условиях. Труды Всесоюзного совещания. Иркутск: СИФиБР СО АН СССР, 1983. – С. 110–124.
4. Лялин, О.О. Феномен выделения корнями растений в окружающий раствор стимулятора дыхания / О.О. Лялин, Е.В. Соловьев // Физиология растений, 1995. – Т. 42. – № 4. – С. 501–506.
5. Мамаев, В.В. Сезонные изменения биомассы молодых поглощающих корней дуба в южной лесостепи / В.В. Мамаев // Лесоведение, 2000. – № 4. – С. 44–50.
6. Мамаев, В.В. Изучение сезонного годичного прироста биомассы микоризных поглощающих корней в дубравах южной лесостепи / В.В. Мамаев // Продукционный процесс и структура лесных биогеоценозов: теория и эксперимент. – М.: Т-во научн. изданий КМК, 2009. – С. 93–106.
7. Молчанов, А.Г. Баланс CO<sub>2</sub> в экосистемах сосняков и дубрав в разных лесорастительных зонах / А.Г. Молчанов. – Тула: Гриф и К, 2007. – 284 с.

8. Новицкая, Л.Л. Карельская береза: механизмы роста и развития структурных аномалий / Л.Л. Новицкая. – Петрозаводск: Verso, 2008. – 144 с.
9. Орлов, А.Я. Экспериментальное изучение влияния недостатка влаги в почвах на жизнедеятельность культур сосны мшисто-лишайниковых сосняков / Орлов А.Я., Абатуров Ю.Д., Богатырев Ю.Г. // Почвенно-экологические исследования в сосновых лесах Мещеры. – М.: Наука, 1980. – С. 86–212.
10. Осипов, В.В. Климат / В.В. Осипов // Структура и функционирование почвенного населения дубрав Среднерусской лесостепи. – М.: Наука, 1995. – С. 12–22.
11. Романовский, М.Г. Система вида у лесных деревьев / М.Г. Романовский, Р.В. Щекалев. – М.: О-принт, 2011. – 168 с.
12. Рост и газообмен CO<sub>2</sub> у лесных деревьев, под ред. А.И. Уткина и Ю.Л. Цельникер. – М.: Наука, 1993. – 256 с.
13. Рубцов, В.В. Ростовые реакции дуба на дефолиацию как фактор обеспечения его жизнедеятельности / В.В. Рубцов, В.В. Мамаев, И.А. Уткина // Структура и функции лесов Европейской России. – М.: Товарищество научных изданий КМК, 2009. – С. 219.
14. Сапанов, М.К. Экология лесных насаждений в аридных регионах / М.К. Сапанов. – М.: Гриф и К, 2003. – 248 с.
15. Черняев, В.М. О значении украинских лесов в отношении южной России / В.М. Черняев. – Харьков: Унив. Типография, 1857. – 50 с.
16. Щербина, К.Г. Сезонные изменения некоторых свойств почвы в связи с ростом корней дуба / К.Г. Щербина // Сообщения Лаборатории лесоведения АН СССР. – Выпуск 1, 1959. – С. 57–61.
17. Mamaev, V.V. Growth dynamic in absorbing roots of oak (*Quercus robur* L.) during periodical draughts // Dynamics of physiological Processes in Woody roots. Booklet of Abstracts, 8-11 October 1995, Ithaca, New York, USA. Boyce Thompson Institute for Plant research. P. 116.

## К ВОПРОСУ О НАЗВАНИЯХ КЛЕТОК МУЖСКОГО ГАМЕТОФИТА СОСНЫ

Л.В. ХРОМОВА, *н.с. Института лесоведения РАН, канд. биол. наук,*  
 М.Г. РОМАНОВСКИЙ, *гл. научн. сотр. Института лесоведения РАН, д-р биол. наук*

*root@ilan.ras.ru, michrom@ilan.ras.ru*

Казалось бы, и вопроса нет. В фундаментальных учебниках ботаники, где описан процесс развития мужского гаметофита сосны, дана однозначная терминология для обозначения последовательно образуемых клеток [2–5, 7–10, 12].

Коротко, процесс развития пыльцы, исходя из приведенных учебных пособий, выглядит таким образом. В микроспорангиях сформировавшегося микроспорофилла клетки археспория превращаются в микроспороциты, которые делятся мейотически и образуют симультанно тетрады микроспор. Микроспоры сосны до образования зрелого пыльцевого зерна проходят три деления. После двух первых образуются две проталлиальные клетки, которые сразу же лизируются. После третьего деления возникает зрелая пыльца, состоящая из меньшей антеридиальной клетки и большей – вегетативной. Название «антеридиальная клетка» вполне правомочно: как впервые четко показал В.И. Беляев (1892) [1], она является гомологом антеридия

папоротникообразных (названий клеткам, последовательно образуемым из антеридиальной клетки, Беляев не дал).

В первый сезон при прорастании пыльцы вегетативная клетка переходит в пыльцевую трубку, и ее ядро останавливается перед разветвлением трубки. В таком состоянии пыльца зимует. На второй год антеридиальная клетка делится в пыльнике на базальную (ближе к стенке) и генеративную, обе выходят в пыльцевую трубку. Генеративная клетка незадолго до оплодотворения дает два спермия. Вегетативная и базальная клетки в трубке погибают и лизируются. Материнскую клетку спермиев в ботанической литературе принято обозначать генеративной не только у голосемянных, но и у покрытосемянных растений [11].

Однако в русских работах, касающихся развития мужского гаметофита сосны, почему-то для названий его клеток используется множество синонимов. Так, антеридиальную клетку называют генеративной [6, 13]; ве-

гетативная клетка обозначается как клетка-трубка, сифоногенная [13, 14]; генеративная – как спермиогенная, сперматогенная [13, 15], клетка-телом, материнская клетка спермиев; базальная – как стебельковая, клетка-ножка, ножковая, постенная, стерильная.

В фундаментальных русских учебниках названия клеток мужского гаметофита исходят из приоритетной терминологии, заданной немецкими эмбриологами (Strasburger E., Hofmeister W.). Поэтому в обобщающей монографии [19] и в немецкой ботанической литературе клетки мужского гаметофита имеют названия сходные с русскими: антеридиальная клетка – die antheridiale Zelle; вегетативная – die Pollenschlauchzelle, клетка трубка; генеративная – die Genertivzelle (die Körperzelle, клетка-телом); базальная – die Stielzelle (die Wandzelle), стебельковая, пристенная, базальная.

По-английски клетки пыльцевого зерна обозначаются так: антеридиальная – generative cell (генеративная), вегетативная – tube cell (клетка-трубка), далее после деления generative cell образуется body cell, (клетка-телом) и stalk cell (стебельковая) [16, 17].

Как мы видим, единой терминологии в отношении клеток мужского гаметофита сосны нет до сих пор. Приоритетные названия из ставших классическими учебников не принимаются во внимание и не вошли в общепринятый научный обиход, а сама терминология до сих пор дискутируется с попытками остановиться в основном на английских названиях [6, 13, 18, 20].

Мы считаем, что эту дискуссию, не принимающую почему-то во внимание то, что давно вошло в фундаментальные пособия, не стоит продолжать. Следует вспомнить, что дорожка эмбриологических терминов идет от немецких ученых к И.Н. Горожанкину и его ученикам М.И. Голенкину, Л.И. Курсанову, К.И. Мейеру и др. Теперешний разнобой в названиях клеток мужского гаметофита приводит к тому, что начинающий исследователь не сразу может сообразить, о каких стадиях развития микрогаметофита идет речь. Сразу понять картину, данную в современных описаниях, может лишь опытный исследователь,

хорошо представляющий весь сложный процесс микроспорогенеза.

Напомним, что в ботанической систематике уже более сорока лет принято правило использования приоритетной номенклатуры, не худо бы применить его и в эмбриологии голосемянных растений, чтобы покончить с имеющейся путаницей в терминах.

### Библиографический список.

1. Беляев, В.И. К учению о пыльцевой трубке голосемянных. О делении клеток в материнских клетках пыльцы у *Latix* / В.И. Беляев // Классики естествознания. Кн. 12. – М.-Пг., 1923. (р-ты 1892). – С. 58–68.
2. Васильев, А.Е. Ботаника. Анатомия и морфология растений / А.Е. Васильев, Н.С. Воронин, А.Г. Еленевский, Г.И. Серебрякова. – М.: Просвещение, 1978. – 478 с.
3. Генкель, П.А. Ботаника / П.А. Генкель, А.В. Кудряшов. – М.: Высш. шк., 1964.
4. Жуковский, П.М. Ботаника / П.М. Жуковский. – М.: Высш. шк., 1964. – 667 с.
5. Жуковский, П.М. Ботаника / П.М. Жуковский. – М.: Колос, 1982. – 622 с.
6. Козубов, Г.И., Тренин В.В., Тихова М.А., Кондратьева З.П. Репродуктивные структуры голосемянных. Сравнительное описание / Г.И. Козубов, В.В. Тренин, М.А. Тихова, З.П. Кондратьева. – Л.: Наука, 1982. – 104 с.
7. Комаров, В.Л. Введение в ботанику / В.Л. Комаров. – М.: Наука, 1949. – 324 с.
8. Курсанов, Л.И., Голенкин Н.И. Курс ботаники / Л.И. Курсанов, Н.И. Голенкин. – М.: Учпедгиз, 1937. – 708 с.
9. Курсанов, Л.И. Ботаника. Т. 1. / Л.И. Курсанов, Н.А. Комарницкий, В.Ф. Раздорский, А.Л. Уранов – М.: Просвещение, 1966. – 423 с.
10. Мейер, К.И. Практический курс морфологии архегонияльных растений / К.И. Мейер. – М.: МГУ, 1982. – 219 с.
11. Поддубная-Арнольди, В.А. Общая эмбриология покрытосемянных растений / В.А. Поддубная-Арнольди. – М.: Наука, 1964. – 482 с.
12. Тихомиров, Ф.К. Ботаника / Ф.К. Тихомиров. – М.: Высш. шк., 1978. – 439 с.
13. Тренин, В.В. Введение в цитозембриологию хвойных / В.В. Тренин. – Петрозаводск: Карел. Фил. АН СССР, ин-т леса, 1988. – 151 с.
14. Третьякова, И.Н. Эмбриология хвойных. Физиологические аспекты / И.Н. Третьякова. – Новосибирск: Наука, 1990. – 155 с.
15. Хржановский, В.Г. Курс общей ботаники / В.Г. Хржановский. – М.: Высш. шк., 1976. – 480 с.
16. Chamberlain, Ch. J. Gymnosperms. Structure and evolution, 3-ed. Chicago: Univ. Chicago, 1966. 484 p.

17. Konar, R.N., Oberoi G.P. Recent work on reproductive structures of living conifers and taxads. A review // Bot. Rev. 1969. V. 35. N. 2. P. 89–116.
18. Sing, H. Embryology of gymnosperms. Berlin-Stuttgart: Borntraeger, 1978. 302 p.
19. Schnarf, K. Embriologie der Gymnospermen. Handbuch der pflanzenanatomie. Abt. 2. Bd. 2. Berlin: Verl. V.K. Linsbauer, 1933. 420 S.
20. Sterling, C. Structure of the male gametophyte in gymnosperms // Biol. Rev. 1963. Vol. 38. P. 167–203.

## СОЗДАНИЕ ПРИРОДНЫХ ПОПУЛЯЦИЙ РЕДКИХ И ИСЧЕЗАЮЩИХ ВИДОВ С ПОМОЩЬЮ КЛОНАЛЬНОГО МИКРОРАЗМНОЖЕНИЯ

О.В. ЧЕРНЫШЕНКО, проф. каф. ботаники и физиологии растений МГУЛ, д-р биол. наук,  
А.Б. ЗАГРЕЕВА, доц. каф. ботаники и физиологии растений МГУЛ

*tchernychenko@mgul.ac.ru, zagreeva@mgul.ac.ru*

Применение нанотехнологии позволяет решить важные задачи селекции на устойчивость, высокую продуктивность и качество, регулировать и автоматизировать выращивание растений. Одно из научных направлений кафедры ботаники и физиологии растений в ближайшем будущем – использование изолированных клеток и тканей, т.е. технология *in vitro*, для сохранения ценного лесного генофонда.

Метод культуры изолированных клеток позволяет проводить эксперимент круглогодично, независимо от сезона, используя при этом малые производственные площади. Растения размножаются достаточно быст-

ро, даже если они представлены минимальным количеством исходного материала, и это особенно важно для древесных растений, имеющих длительный период развития. Эти методы позволяют повышать генетическое разнообразие исходных форм и отбирать среди них хозяйственно ценные, сохраняя полезный генофонд.

Клональное микроразмножение – это способ вегетативного размножения, позволяющий с помощью культуры тканей (*in vitro*), получить растения, генетически идентичные исходному экземпляру. Соматические клетки растений способны полностью реализовать свой потенциал развития *in vitro* и давать



Фото 1. Линнея северная *Linnaea borealis* L

начало зрелому растительному организму. Для сохранения редких и исчезающих видов, в том числе занесенных в Красную книгу, микрклональное размножение *in vitro* позволит сохранять генотипы таких растений, их



Фото 2. Ветреница дубравная *Anemone nemorosa* L.



Фото 3. Печеночница благородная *Hepatica nobilis* Mill

размножать и возвращать их в природную популяцию. Изолированные части растения при благоприятных условиях питательной среды могут восстанавливать недостающие органы, регенерируя целое растение. Любые части тканей (изолированные зародыши, листья, стебли, семядоли, чешуйки и донца луковиц, сегменты корней и зачатков соцветий) могут быть использованы для образования адвентивных почек. Это наиболее распространенный метод микроразмножения высших растений.

Первичным фрагментом ткани (эксплантантом) служат сегменты чешуй (луковичные культуры), листья (розеточные виды) и пазушные почки (растения с вертикальным ростом). Уже разработанные технологии позволяют в течение 2 месяцев получать из одного фрагмента от 8 шт. до 15 тыс. растений в зависимости от вида [1].

Цель наших исследований – усовершенствование методов биотехнологии для получения посадочного материала редких и исчезающих видов и возвращение их в лесопарки Москвы [2]. Сохранение редких видов растений – это часть общей проблемы восстановления и рационального использования природных растительных ресурсов. В работе по охране видов Москвы и Московской области уже составлены списки редких и исчезающих видов и точечные карты их распространения, изучена экология, биология развития и способы размножения, практические меры по охране этих видов [3]. Но в сложившихся условиях изучения и охраны видов нашего региона такой подход недостаточен, так как темпы исчезновения редких видов ускоряются. В связи с этим мы предлагаем практическую реализацию сохранения видов, подвидов и форм растений. В Красную книгу Москвы занесено 154 вида растений, из них сосудистых – 101, мохообразных – 27, водорослей – 8, лишайников – 18 (2001) [4]. Необходим контроль состояния популяций редких видов и принятие необходимых мер охраны. Исчезающие виды, численность популяций которых достигла критического уровня в пределах Москвы, и выживание таких видов не гарантировано, а воздействие агрессивных факто-

ров среды будет продолжаться, мы предлагаем размножить в лаборатории. Уже составлен список редких, исчезающих и восстанавливающихся видов. Каждый вид отнесен к отдельной категории, принятой в Красной книге Российской Федерации (2001).

Среди редких видов были выбраны исчезнувшие виды, которые перестали стационарно обитать на территории Москвы в период после 1960 г., а также виды, численность которых сократилась до критически низкого уровня и они могут исчезнуть в ближайшее время (0 и 1 категории) [5].

Зимолюбка зонтичная *Chimaphila umbellata* (L.), семейство Грушанковые, вечнозеленый многолетник с ползучим корневищем, от которого отходят приподнимающиеся побеги высотой до 20 см, индикатор сухих мест произрастания. Растет в сухих сосновых, реже еловых лесах. Микотрофное растение, размножающее обычно вегетативным путем.

Линнея северная (фото 1) *Linnaea borealis* L., семейство Жимолостные, вечнозеленый кустарничек со стелящимися побегами до 200 см и приподнимающимися веточками до 15 см. Мезофит, растет на кислых почвах, очень бедных минеральным азотом. Предпочитает места со средней освещенностью. Встречается в преимущественно мшистых хвойных лесах, иногда в смешанных и на вырубках.

Подлесник европейский *Sanicula europaea* L., семейство Зонтичные. Многолетнее растение, прикорневые листья с длинными черешками. Лесной вид. Растет в широколиственных, реже смешанных и хвойных лесах. Размножается и распространяется преимущественно семенами.

Колокольчик болонский *Campanula bononiensis* L., семейство Колокольчиковые. Многолетнее растение высотой до 120 см, стебель опушен. Растет в зарослях кустарников, на лесных опушках, сухих лугах. Декоративное растение.

Колокольчик жестколистный *Campanula cervicaria* L., семейство Колокольчиковые. Двулетнее растение высотой до 100 см, стебель и листья густо усажены жестки-

ми волосками. Растет в лесах, на полянах, вырубках и зарослях кустарников, по краям лесных болот.

Ветреница дубравная (фото 2) *Anemone nemorosa* L., семейство Лютиковые. Многолетнее растение с мясистым корневищем. Весенний эфемероид. Растет в широколиственных, мелколиственных и хвойных лесах, по опушкам и полянам. Декоративное растение.

Лютик длиннолистный *Ranunculus lingua* L., семейство Лютиковые. Многолетнее крупное травянистое растение, стебель с длинными междоузлиями, высотой до 150 см. Растет по берегам водоемов, болотам, нередко в воде.

Печеночница благородная (фото 3) *Hepatica nobilis* Mill. Многолетнее травянистое растение высотой до 15 см, корневищное, с прикорневыми трехлопастными листьями, которые вырастают после цветения и уходят под снег зелеными. Растение декоративное. Растет в хвойных и смешанных лесах, на опушках и полянах.

Любка двулистная (фото 4) *Platanthera bifolia* (L.), семейство Орхидные. Многолетник с продолговато-яйцевидным клубнем,



Фото 4. Любка двулистная *Platanthera bifolia* (L.)

стебель высотой до 60 см. Размножается семенами и иногда вегетативным путем, благодаря образованию дочерних клубней. Очень декоративна. Растет в светлых, сыроватых лесах, лесным лугам, на полянах и опушках, избегает сухих и избыточно влажных местобитаний.

Такие виды находятся под угрозой полного исчезновения и их спасение и восстановление невозможно без искусственного восстановления. Они страдают от чрезмерно антропогенного, главным образом рекреационного воздействия. Вблизи крупных городов отмечается уменьшение численности красиво цветущих декоративных видов, особенно ранневесенних и лекарственных растений.

Выращивая эти растения и возвращая их в природную популяцию, мы сможем решить важную экологическую проблему – сохранение биоразнообразия городских лесов Москвы. Однако самым надежным методом охраны видов растений является сохранение и охрана фитоценозов, что неразрывно связано с проблемой рационального использо-

вания, восстановления и охраны природных ресурсов.

### Библиографический список

1. Калашникова, Е.А. Получение посадочного материала древесных, цветочных и травянистых растений с использованием методов клеточной и лесной инженерии: учеб. пос. / Е.А. Калашникова, А.Р. Родин. – М: МГУЛ, 2001. – 73с.
2. Редкие и исчезающие виды природной флоры СССР, культивируемые в ботанических садах и других интродукционных центрах страны, под ред. П.И. Лапина. – М.: Наука, 1983. – 301 с.
3. Кауфман, Н.Н. Московская флора, или описание высших растений и ботанико-географический обзор Московской губернии: 2-е изд. испр. и доп., под ред. П.Ф. Маевского / Н.Н. Кауфман. – М.: Гербек, 1889. – 760 с.
4. Красная книга города Москвы / Департамент природопользования и охраны окружающей среды Правительства Москвы; Московский комитет по науке и технологиям; Экологический фонд развития городской среды «Экогород». Отв. ред. Б.Л.Самойлов, Г.В.Морозова. – М.: АБФ, 2001. – 624 с.
5. Маевский, П.Ф. Флора Средней полосы Европейской части России, 10-е изд. / П.Ф. Маевский. – М.: ТНИ КМК, 2006. – 600 с.

## ДЕНДРОХРОНОЛОГИЧЕСКИЙ МЕТОД ОТБОРА ДЕРЕВЬЕВ ДЛЯ ДАЛЬНЕЙШЕГО МИКРОКЛОНАЛЬНОГО РАЗМНОЖЕНИЯ ИХ С УЧЕТОМ ПРОДУКТИВНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ ВИДОВ

О.В. ЧЕРНЫШЕНКО, зав. каф. ботаники и физиологии растений МГУЛ, д-р биол. наук,  
Д.Е. РУМЯНЦЕВ, доц. каф. ботаники и физиологии растений МГУЛ, канд. биол. наук

*tchernychenko@mgul.ac.ru, landgraph@list.ru*

Создание новых высокопродуктивных лесных насаждений является актуальной задачей лесного хозяйства (фото 1, 2, 3). Методы биотехнологии позволяют размножить виды с повышенной устойчивостью к биотическим и абиотическим факторам, повышенной продуктивностью, обладающими уникальными свойствами.

Высшие растения размножаются двумя способами: половым (семенами) и вегетативным. Для лесных видов основным способом размножения является семенной. За один вегетационный период из семян можно вырастить большое количество посадочного материала.

Однако для деревьев характерен ювенильный период, первый урожай может быть в возрасте 20–40 лет и позже, не каждый год бывает урожайным. В результате полового процесса в потомстве происходит расщепление признаков, и за счет его генетической неоднородности могут быть потеряны ценные генетические признаки. Для лесохозяйственного производства является актуальным размножение древесных растений в возрасте выше 20 лет, когда можно оценить их хозяйственные признаки. Современные методы размножения растений позволяют получать растения, генетически идентичные исходному материалу.



Фото 1. Высокопродуктивные лесные культуры дуба красного в провинции Шампань, Франция



Фото 2. Лесные плантации тополя в провинции Шампань, Франция



Фото 3. Лесные плантации пихты в провинции Шампань, Франция

Сохранить генотип материнского растения можно с помощью вегетативного размножения, однако оно ограничено возрастом деревьев: с помощью черенкования практически невозможно размножить деревья старше 10–15 лет. К тому же традиционные методы вегетативного размножения требуют больших производственных площадей и длительности времени, но не гарантируют получения стандартного здорового посадочного материала.

Современный способ вегетативного размножения, размножение растений с помощью культуры тканей (*in vitro*), это клональное микроразмножение [1, 2], позволяющее получить растения генетически идентичные исходному экземпляру. Этот метод использует уникальная способность соматических клеток растений тотипотентность – полностью реализовывать свой потенциал развития *in vitro*, и под влиянием гормонов в составе питательной среды давать начало зрелому растительному организму.

Клональное микроразмножение позволяет получить генетически однородный материал. Коэффициент размножения составляет для травянистых растений до  $10^3$ , для кустарниковых и древесных  $10^4$ – $10^5$ , для хвойных  $10^4$ . Этот метод дает возможность получить вегетативное потомство растений, трудно размножаемых традиционными способами, и одновременно с размножением оздоравливать растения. Сохранять и размножить ценный генофонд и уникальные генотипы. Размножать растения, независимо от сезона и климата. Производственные площади сокращаются – в относительно небольшой лаборатории можно выращивать тысячи растений. Появляется возможность проводить обмен пробирочными растениями между научными учреждениями, исключая возможность их заражения карантинными болезнями.

В последнее время были усовершенствованы методы работы с изолированными тканями и клетками древесных растений. Это было связано с трудностями культивирования не только ювенильных, но и взрослых

тканей, изолированных с растения. Древесные растения, и особенно хвойные, трудно укореняются, медленно растут и содержат большое количество вторичных веществ, которые в изолированных тканях активизируются и окисляют фенолы растений. Продукты окисления фенолов ингибируют деление и рост клеток, эксплант или гибнет или уменьшается регенерационная способность адвентивных почек, которая с возрастом растения-донора постепенно исчезает. Однако эти проблемы постепенно решаются. Уже насчитывается 2000 видов древесных растений из 40 семейств, которые были размножены *in vitro* (каштан, дуб, береза, клен, осина, ель, секвойя, лжетсуга, и др.) [3]. С каждым годом количество видов, способных к размножению *in vitro*, увеличивается.

В клональном микроразмножении используют культуру изолированных меристем для размножения древесных. Активизация развития меристем растения из верхушечных и боковых почек стебля позволяет использовать только меристематические ткани, обладающие генетической стабильностью. Самый первый этап работы – выбор растения-донора. Ответственность этого этапа трудно переоценить, очень важно заранее быть уверенными в том, что растение обладает заданными наследственными свойствами. Лабораторные исследования не дают полноценной информации о закономерностях роста растения в условиях экосистемы, так как там растение находится в среде со множеством меняющихся факторов и в условиях конкуренции с другими растениями. В то же время такую информацию трудно получить и путем прямых опытов в полевых условиях, так как для этого необходимо вести наблюдения в течение всего вегетационного сезона и многократно и последовательно вести наблюдения из года в год. Также трудность в постановке опыта создает невозможность воспроизводить его по желанию экспериментатора. Например, нельзя заранее запланировать развитие засухи или резкое похолодание или воздействие другого экстремального фактора среды. Учитывая данные радиального прироста, можно выбирать деревья для дальнейшего микро-

клонального размножения в возрасте 40–120 лет и старше.

Анализ информации годичных колец древесных растений позволяет достичь поставленных целей. В своей изменчивости годичные кольца регистрируют результаты множества экспериментов, поставленных над растением природой в течение его жизни. Дендрохронологический метод дает широкие возможности для ретроспективного мониторинга продуктивности древесных растений, что представляет интерес для выбора деревьев с исключительными лесохозяйственными свойствами. Дендрохронологическую информацию можно рассматривать как запись результатов серии опытов, проведенных природой над данным генотипом в разных экологических условиях. Такая информация позволяет проанализировать закономерности роста дерева, его устойчивость в естественных условиях. Этот метод позволит выбирать деревья, устойчивые к засухе и морозам, насекомым и болезням, загрязнению атмосферного воздуха и антропогенным нагрузкам, а также солеустойчивые [4,5]. Также возможен отбор с учетом качества древесины. Учитывая экофизиологические аспекты древесно-кольцевой информации, мы можем предложить следующие виды для микроразмножения: сосна обыкновенная, сибирская кедровая, кедровая корейская, веймутова, ель европейская, сибирская, аянская, канадская, красная и др., псевдоцугу, дубы черешчатый, красный и др., лиственницы европейская, сибирская, японская, даурская и др., тополя дрожащий, серебристый, черный, канадский и др.

Выбирая деревья с помощью дендрохронологического анализа, можно получить высококачественный посадочный материал любого вида древесных растений с заранее известными свойствами. Во Франции, Германии, Италии, США и других развитых странах клональное микроразмножение используется в коммерческой биоиндустрии, поставляющей такой посадочный материал. Мы надеемся, что технологические разработки в этой области станут использоваться в России для создания высокопродуктивных лесных плантаций.

### Библиографический список

1. Бутенко, Р.Г. Культура изолированных тканей и физиология морфогенеза растений / Р.Г. Бутенко. – М.: Наука, 1964. – 272с.
2. Бутенко, Р.Г. Биология клеток высших растений *in vitro* и биотехнология на их основе. Учебное пособие / Р.Г. Бутенко. – М.: МГУ, 1999. – 160с.
3. Калашникова, Е.А. Получение посадочного материала древесных, цветочных и травянистых растений с использованием методов клеточной и лесной инженерии: учеб. пос. / Е.А. Калашникова, А.Р. Родин. – М.: МГУЛ, 2001. – 73 с.
4. Румянцев, Д.Е. История и методология лесоводственной дендрохронологии / Д.Е. Румянцев. – М.: МГУЛ, 2011. – 109 с.
5. Дендрохронологическая информация в лесоводственных исследованиях: монография: под. ред. В.А. Липаткина, Д.Е. Румянцева. – М.: МГУЛ, 2007. – 137 с.

## НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ АНАЛИЗА ДНК ДЛЯ ГЕНЕТИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ КЛОНОВ НА ЛСП СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ

О.К. ШИШКИНА, *нач. отдела селекции и генетики ФГУ «Рослесозащита»*, канд. биол. наук,  
 М.А. ЗАВИСТЯЕВА, *асп. каф. селекции, генетики и дендрологии МГУЛ*,  
 А.С. РАБЦУН, *асп. каф. селекции, генетики и дендрологии МГУЛ*

*zhu4ok69@mail.ru*

Леса России занимают площадь около 1/5 лесов планеты и содержат половину мировых запасов хвойных пород. Они играют огромную роль в глобальных процессах регулирования состояния окружающей среды и предотвращения негативных изменений климата. Все это объективно определяет статус нашей страны как многолесной державы. Однако в отличие от других стран леса России в большей своей части расположены в зоне достаточно сурового климата с вечной мерзлотой, с более коротким периодом вегетации, что делает их своеобразными. Они отличаются низкой продуктивностью, медленными темпами смены поколений и длительным и медленно протекающим процессом естественного лесовосстановления. Поэтому леса России более подвержены воздействию неблагоприятных природных и, особенно, техногенных факторов, неуклонно возрастающих с начала XX в., а также интенсивных промышленных рубок леса, вызывающих во многих случаях и во многих регионах страны неблагоприятную смену породного состава лесов и заметное обеднение их природного генофонда.

В целях сохранения генетического фонда высокопродуктивных насаждений, получения семян с улучшенными наследственными свойствами в СССР была создана постоянная

лесосеменная база объектов единого генетико-селекционного комплекса (объекты ЕГСК).

К настоящему времени по разным причинам значительное число объектов ЕГСК находится в полупригодном состоянии и нуждается в широкомасштабных работах, необходимых для дальнейшего развития лесного селекционного семеноводства и повышения эффективности его практического использования.

Первым пунктом в этом списке должна значиться генетическая паспортизация объектов ЕГСК. Она позволит дать ясную оценку итогам проведенной ранее объемной работы определить будущие количественные и качественные ее результаты.

Важнейшим элементом ЕГСК постоянной лесосеменной базы лесосеменного района являются лесосеменные плантации (ЛСП) первого и последующих порядков. Плантации, созданные потомством плюсовых деревьев (отбор по фенотипу), относят к ЛСП-1. Плантации второго порядка (ЛСП-2) создают вегетативным потомством плюсовых деревьев, прошедших генетическую оценку (элитные деревья). Полученные на них семена относят к селекционной категории «условно сортовые». Сортовые семена могут быть получены на ЛСП высших порядков после проведения государственного сортоиспытания.

Идентификация клонов в лесном семеноводстве имеет большое значение, поскольку прогнозируемое повышение продуктивности создаваемых лесных насаждений при использовании улучшенных семян составляет 15–20 %, а генетический эффект, определяемый по скорости роста, оценивается в среднем на уровне 8...9 % с колебаниями от 5 до 25 % (Долголиков, Мордась, 1986; Ефимов, 1987); но в результате испытаний потомства этот эффект может быть увеличен (Ефимов, 2000). Поскольку определить генетическую принадлежность клонов по фенотипу и биометрическим показателям невозможно, необходимо применение принципиально новых достаточно достоверных и скоротечных методов.

Применение методов молекулярно-генетических исследований на объектах ЕГСК позволяет наиболее быстро и эффективно решить ряд вопросов, важных с точки зрения селекционно-генетической ценности объектов. Наиболее удобным для этого является один из методов анализа ДНК, именуемый RAPD – анализом (Random Amplified Polymorphic DNA – произвольно амплифицированная полиморфная ДНК). Метод достаточно прост в исполнении и не требует применения дорогостоящих реактивов.

Анализ непосредственно ДНК позволяет гораздо быстрее и с высокой степенью достоверности провести генетическую идентификацию. В качестве образца может использоваться любая часть растения в свежем, замороженном, заспиртованном или сухом виде. Высушенные образцы легко транспортировать и хранить. Анализ одного образца проводится в течение 2-х дней, один комплект оборудования позволяет одновременно проводить анализ 48 образцов.

RAPD-анализ включает выделение ДНК, амплификацию выделенной ДНК, электрофоретическое разделение фрагментов амплифицированной ДНК и анализ полученных электрофореграмм.

На основании данных анализа каждому растению присваивается свой паспорт. Плантация, на которой каждое принадлежащее ей растение было идентифицировано, тоже получает паспорт.

К настоящему времени методом RAPD-анализа исследовано пять плантаций, на которых произрастают клоны сосны обыкновенной на территории Куровского ОЛХ Московской области и Андреевского ОЛХ Владимирской области. Следует отметить: несмотря на то, что некоторые из этих плантаций не попадают под современные критерии, по которым производится технология создания ЛСП, необходимо учитывать более раннее время их образования, существенные материальные средства, потраченные на их закладку и уход за ними, а так же величину возраста некоторых насаждений.

Краткие результаты проделанной работы.

Куровское ОЛХ Московской области.

1) Лесосеменная плантация № 33.

Кв.61, площадь 6,0 га, схема посадки 5х10 м, год закладки – апрель 1981 г.

Характеристика ЛСП по состоянию на 2009 г.

Число посадочных мест – 1070 шт., количество деревьев на ЛСП – 566 шт. (52,8 %) Из них: привитых – 382 шт. (67,4 %), непривитых – 184 шт. (32,6 %).

Из привитых.

Расположены согласно схеме посадки – 141 шт. (36,9 %).

Расположены на других посадочных местах – 110 шт. (28,7 %).

Всего рамет идентифицированных клонов – 251 шт. (65,6 %).

Происхождение растений неизвестно, аналогов на ЛСП не имеют (х)– 131 шт. (34,4 %).

Всего представлено 22 клона. Происхождение клонов – плюсовые деревья Московской области.

2) Лесосеменная плантация № 41.

Кв.61, площадь 1,0 га, схема посадки 5·10 м, год закладки – 1984.

Характеристика ЛСП по состоянию на 2009 г.

Число посадочных мест – 200 шт. Количество деревьев на ЛСП – 68 шт. (34,0 %).

Из них.

Расположены согласно схеме посадки – 34 шт. (50,0 %).

Расположены на других посадочных местах – 33 шт. (48,5 %).

Всего рамет идентифицированных клонов – 67 шт. (98,5 %).

Происхождение растений неизвестно, аналогов на ЛСП не имеют (х) – 1 шт. (1,5 %).

Представлено 12 клонов плюсовых деревьев Московской области.

3) Лесосеменная плантация № 47.

Кв. 63, площадь 10,0 га, схема посадки 8·10 м, год закладки – 2000.

Характеристика ЛСП по состоянию на 2010 г.

Число посадочных мест – 1235. Количество сохранившихся деревьев на ЛСП – 1155 шт. (сохранность 93,5 %).

Из них.

Расположены согласно схеме посадки – 1089 шт. (94,2 %).

Расположены на других посадочных местах – 41 шт. (3,5 %).

Всего рамет идентифицированных клонов – 1130 шт. (97,8 %).

Происхождение растений неизвестно, аналогов на ЛСП не имеют (х) – 25 шт. (2,1 %).

Всего представлено 125 клонов.

4) Лесосеменная плантация № 48.

Кв. 55, площадь 8,0 га, схема посадки 8х10 м, год закладки – 2003 г.

Характеристика ЛСП по состоянию на 2009 г.

Число посадочных мест – 1180 шт. Количество сохранившихся деревьев на ЛСП – 873 шт. (73,9 %).

Из них.

Расположены согласно схеме посадки – 744 шт. (85,2 %).

Расположены на других посадочных местах – 86 шт. (9,8 %).

Всего рамет идентифицированных клонов – 830 шт. (95,0 %).

Происхождение растений неизвестно, аналогов на ЛСП не имеют (х) – 43 шт. (5 %).

Всего представлено 85 клонов.

Мошкское лесничество, Андреевский лесхоз.

5) Лесосеменная плантация № 1.

Кв. 25, выд. 1., поле 1, площадь 11,0 га, схема посадки 8Ч8 м. Период закладки – октябрь 2006 г.

Характеристика ЛСП по состоянию на 2009 г.

Число посадочных мест – 1615. Количество сохранившихся деревьев на ЛСП – 907 шт. (сохранность 56,1 %).

Из них.

Расположены согласно схеме посадки – 575 шт. (63,4 %).

Расположены на других посадочных местах – 148 шт. (16,4 %).

Всего рамет идентифицированных клонов – 723 шт. (79,7 %).

Происхождение растений неизвестно, аналогов на ЛСП не имеют (х) – 96 шт. (10,5 %).

Являются ракетами неидентифицированного клона (1х, 2х... ) – 88 шт. (9,7 %).

Происхождение клонов – плюсовые деревья Владимирской области.

Всего представлено 62 клона.

При тестировании сделан анализ ДНК каждой раметы клонов на плантации в сравнении с исходным плюсовым деревом. Составлены уточненные схемы расположения клонов.

Таким образом, из проделанной работы можно сделать вывод, что анализ ДНК позволяет полностью прояснить схему расположения рамет клонов на ЛСП, выявить все ошибки при посадке и разработать комплекс мероприятий по дальнейшему использованию или реконструкции изучаемых объектов. Так, например, ЛСП № 33 и ЛСП № 41 Куровского ОЛХ Московской области нуждаются в полной реконструкции или переведении в категорию ПЛСУ, а ЛСП № 47, 48 – в частичной. Здесь необходимо удалить неидентифицированные раметы, количество которых менее 5 %, и произвести подсадку на пустых местах. ЛСП № 1 Владимирской области нуждается в значительной реконструкции.

#### Библиографический список

1. Падутов, В.Е. Методы молекулярно-генетического анализа / В.Е. Падутов, О.Ю. Баранов, Е.В. Воробьев. – Мн.: Юнипол, 2007. – 176 с.
2. Указания по лесному семеноводству в Российской Федерации. – М.: ВНИИЦлесресурс, 2000.

## ФОРМИРОВАНИЕ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУР В ДЕКОРАТИВНО-ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЯХ

В.И. АЗАРОВ, *проф. каф. хим. технологии древесины и полимеров МГУЛ, акад. РАЕН, д-р техн. наук,*

В.А. ВИНОСЛАВСКИЙ, *проф. каф. хим. технологии древесины и полимеров МГУЛ, д-р техн. наук,*

А.Н. ЗАРУБИНА, *доц. каф. хим. технологии древесины и полимеров МГУЛ, канд. техн. наук,*  
А.В. КОНДРАТЬЕВ, *асп. каф. хим. технологии древесины и полимеров МГУЛ*

*vinoslavskiy@mgul.ac.ru*

В связи с возросшими требованиями к качеству и экологической безопасности изделий, получаемых с использованием полимерных пропиточных составов, возникает необходимость поиска новых прогрессивных композиций для пропитки декоративных бумаг. Применение технологических процессов изготовления декоративно-защитных бумажных покрытий, базирующихся на использовании полимерных пропиточных составов на водной основе, позволяет снизить вредные выбросы в атмосферу при пропитке и сушке бумажного полотна, нанесения его на поверхность ДСтП. При этом полимерная композиция должна обладать хорошей пропитывающей способностью, высокой адгезией к целлюлозным материалам и обеспечивать пленочному покрытию высокие физико-механические характеристики. Капиллярная и поверхностная впитываемость текстурной бумаги определяется коэффициентом проницаемости, который для полых капилляров целлюлозных волокон резко возрастает, начиная с радиуса пор 5 мкм. [1]

Известно применение в качестве модифицирующих добавок к меламиноформаль-

дегидным олигомерам полиакрилатов, свойства которых зависят от химического строения полимеров и их соотношения в пропиточных аминосолах [2, 3]. Полиакрилаты применяются в виде водных дисперсий, водорастворимых солей, водных эмульсий [4, 5]. В связи с этим представляло интерес использовать акриловые дисперсии на водной основе марок Finndisp A 2001, A 2002 и стирол-акриловую дисперсию Acronal 500 D [6, 7]. Данные продукты представляют собой непластифицированные дисперсии акриловых сополимеров с размерами частиц менее 100 нм, технологические характеристики которых представлены в таблице.

Полимерные пленки на основе дисперсий Finndisp A 2001, A 2002 и Acronal 500D обладают высокой химической стойкостью, нерастворимы в органических растворителях, а также обладают высокой адгезией к различным материалам и имеют высокие физико-механические характеристики. Так как минимальная температура пленкообразования дисперсий имеет разное значение, то необходимо было установить оптимальное соотношение данных дисперсий, для обеспе-

Т а б л и ц а

Технологические свойства дисперсий

Наименование показателя	Значение для дисперсии		
	Finndisp		Acronal 500D
	A 2001	A 2002	
Массовая доля нелетучих веществ, %	48	48	50
Вязкость при 23 °С, мПа	300	300	700
рН	8–9	8–9	7,5–9,0
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,04	1,07	1,04
Минимальная температура пленкообразования (МТП), °С	0	54–56	20
Размер частиц, нм	≤ 100	≤ 100	≤ 100

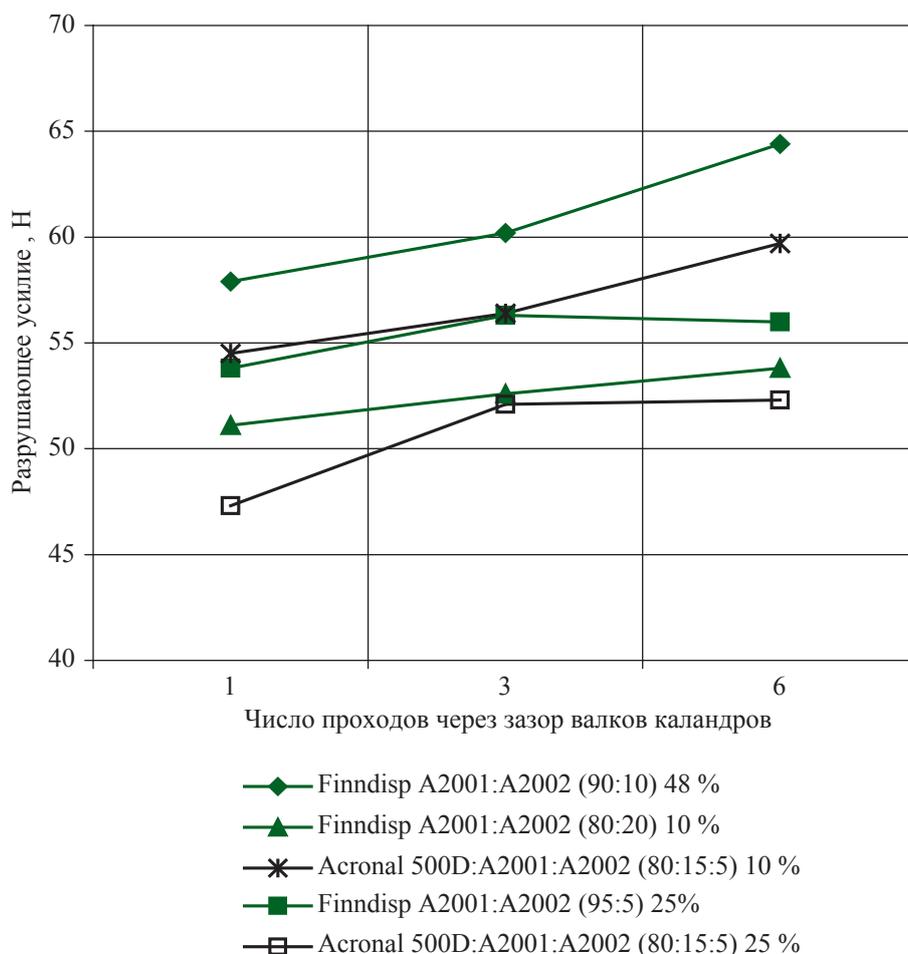


Рисунок. Зависимость разрушающего усилия при растяжении (в машинном направлении) от числа проходов через зазор валков каландра

чения высоких прочностных показателей декоративных бумаг на основе смесей дисперсий Finndisp A2001, A2002 и Acronal 500D. Массовое соотношение дисперсии А 2001 к А 2002, обеспечивающие достаточную твердость, составляло 90:10, 95:5, 80:20.

С учетом хорошей водоразбавляемости данных дисперсий были приготовлены композиции с содержанием сухого остатка 48 %, 25 %, 10 %. Известно, что для пропитки декоративных бумаг содержание сухого вещества должно находиться в диапазоне от 50 % до 10 %. При этом происходит полная пропитка бумаги с получением декоративно-защитной пленки, обладающей высокими физико-механическими показателями. Так как пленки, полученные на основе дисперсии Acronal 500 D, отличались недостаточной прочностью при растяжении, в пропиточные составы на ее основе были введены дисперсии А 2001 и А

2002, которые брали в массовых соотношениях 80:15:5 соответственно.

Увеличить адгезионное взаимодействие между волокнами бумаги и макромолекулами сополимеров возможно уплотнением пропитанного и высушенного бумажного полотна при помощи операции каландрования, при которой происходит снижение микропустот и пор. При этом некоторое вытягивание пленок способствует направленной ориентации макромолекул полимера, что должно также улучшить физико-механические свойства готовых материалов. Полотно пропитанной текстурной бумаги массой 70 г/м<sup>2</sup> (ОАО «Маяк» г. Пенза, воздушная сушка) было подвергнуто каландрованию. Число последовательных проходов пропитанного бумажного полотна через зазор между валками каландра составило 1, 3, 6 раз (контактное давление 4 кгс/м<sup>2</sup>).

Показатели пленок, полученных при пропитке акриловыми дисперсиями на водной основе в выбранных массовых соотношениях с содержанием сухого остатка 50 %, 25 %, 10 % для Finndisp A2001:A2002 и 25 % и 10 % для Acronal 500 D, представлены на рисунке.

С увеличением числа проходов бумажного полотна через зазор между валками каландра постепенно повышается плотность материала, ориентация наполнителя и полимерной матрицы, о чем свидетельствуют представленные данные рисунке. Наблюдаемые процессы способствуют возрастанию суммарного эффекта всех сил межмолекулярного взаимодействия, что и сопровождается повышением механических характеристик получаемых материалов, в том числе прочности при растяжении.

Использование в качестве пропиточных составов для декоративных бумаг нетоксичных акриловых дисперсий на водной основе, представляющих собой тонко дисперсные системы, размеры частиц которых находятся в пределах 100 нм, позволяет получать высококачественные в эстетическом и эксплуатационном отношении покрытия, расширяя возможности их применения для отделки различных видов изделий из древе-

сины. Необходимо проведение дальнейших всесторонних исследований указанных материалов с целью нахождения оптимальных условий их получения.

### Библиографический список

1. Винославский, В.А. Пропитка декоративной бумаги синтетическими полимерами / В.А. Винославский, В.И. Азаров // Науч. технология и оборудование для переработки древесины. – Вып. 335 – М.: МГУЛ, 2007. – 244–251 с.
2. Коршак, В.В. Взаимодействие высокомолекулярных модификаторов с компонентами меламиноформальдегидных композиций / В.В. Коршак, В.И. Кульчицкий, Т.М. Бобчаницер и др. // Пласт. массы. – № 7. – М., 1982. – 30–31 с.
3. Климова, Т.В. Структура и свойства пленок из коллоидно-химически модифицированных латексов / Т.В. Климова, В.И. Фартунин, В.В. Верховланцев // Лакокрасочные материалы и их применение. – № 2. – 1981 – 10–11 с.
4. Сусская, Н.Н. Применение акриловых эмульсий в производстве рулонных облицовочных материалов / Н.Н. Сусская // Деревообрабатывающая промышленность – № 10 – 1985. – С. 24–25.
5. Карташевская, О.В. Получение, свойства и применение водорастворимых акриловых полимеров. Обзорная информация НИИ ТЭХИМ. / О.В. Карташевская – М., 1982. – 1–42 с.
6. <http://msd.com.ua/lkm/11/>
7. <http://www.sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/2727.html>

## МОДИФИЦИРОВАНИЕ МИКОЛОГИЧЕСКИ РАЗРУШЕННОЙ ДРЕВЕСИНЫ НАНОДИСПЕРСИЯМИ ЭЛЕМЕНТООРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

В.И. АЗАРОВ, *проф. каф. хим. технологии древесины и полимеров МГУЛ, акад. РАЕН, д-р техн. наук,*

Г.Н. КОНОНОВ, *проф. каф. хим. технологии древесины и полимеров МГУЛ, канд. техн. наук,*

Н.Л. ГОРЯЧЕВ, *асп. каф. хим. технологии древесины и полимеров МГУЛ,*

А.А. ФАНЬКОВСКАЯ, *асп. каф. хим. технологии древесины и полимеров МГУЛ*

*kononov@mail.ru*

Микологическое разрушение древесины приводит к резкому изменению ее физико-механических свойств, следствием чего является разрушение целостности конструкций, а и иногда полного их выхода из строя. Этому процессу может препятствовать целенаправленное модифицирование древесины на ранних стадиях ее биоразрушения с помо-

щью введения в ее массив различных водных нанодисперсий элементоорганических соединений.

Помимо резкого изменения физико-механических свойств, микологическое разрушение древесины резко изменяет компонентный состав, что является основанием для дальнейшей ее химической пе-



I – белая гниль

II – мраморная гниль

III – Краснина

Рис. 1. Декоративные изделия из древесины, пораженной белой гнилью (I), мраморной гнилью (II), грибной окраской «красниной» (III)

реработки. Так, например, дереворазрушающие грибы, приводящие к образованию белой гнили, увеличивают относительное содержание целлюлозы, а микологическое разрушение с образованием бурой гнили, приводит к относительному увеличению содержания таннидов и лигнина, а в некоторых случаях и к абсолютному их содержанию за счет процессов конденсации продуктов биофрагментации лигнинов определяемых как танниды [5].

Также вопрос микологического разрушения древесины интересен в таком экзотическом ее использовании, как изготовление дорогостоящих образцов элитной мебели, а также художественных интерьерных изделий и различных сувениров, например, из древесины пораженной «мраморной гнилью», белой гнилью и грибными окрасками (рис. 1).

Гнили по характеру разрушения древесины можно разделить на три основных типа: пеструю (коррозионную, или губчато-волоконистую), белую (коррозионно-деструктивную, или трухляво-волоконистую) и бурую (деструктивную, или трухлявую). Во многих случаях два первых типа объединяют под названием белых гнилей, которые, однако, чрезвычайно разнообразны в отличие от бурых гнилей, где характер разложения древесины во всех случаях почти одинаков [6].

Для каждого из этих типов характерно своеобразное изменение внешнего вида древесины, ее структуры, состава и свойств, также играет роль стадия гниения.

I стадия – начальная. Пораженная древесина сохраняет нормальную структуру, твердость и внешне гниение незаметно, но изменяется ее цвет.

II стадия – развитая гниль. Древесина сохраняет еще значительную твердость, хотя ее механические свойства и объемный вес уже сильно понижены.

III стадия конечная – гниль. Древесина приобретает характерный для гнили того или иного типа внешний вид и структуру. Ее легко можно ломать, крошить или расщеплять на волокна.

Характерные возбудители процесса образования пестрой гнили являются дереворазрушающие грибы *Stereum abietinum*, *Fomitopsis annosa* и *Phellinus pini*.

Белая гниль встречается на лиственных и реже на хвойных породах. Основными возбудителями белой гнили на березе являются настоящий трутовик (*Fomes fomentarius* /Fr./ *Kickx*), ложный трутовик (*Phellinus igniarius* /Fr./ *Quel.*, *syn. Fomes igniarius Kickx*) и опенок настоящий (*Armillariella mellea* /Fr./ *Karst.*, *syn. Armillaria mellea Quel*).

Бурая гниль встречается на всех хвойных и многих лиственных породах. Ее характерные возбудители: *Fomitopsis pinicola*, *F. officinalis*. На березе чаще всего бурую гниль вызывает *Piptoporus betulinus*, он же березовая губка или березовый трутовик [1].

Кроме дереворазрушающих грибов, существует паразитирующая группа микроскопических грибов, вызывающих изменение окраски древесины. Окраски от деятельнос-

Т а б л и ц а 1

**Химический состав здоровой и микологически разрушенной древесины, %**

Древесная порода / Химический состав	Береза			Осина		
	Здоровая	Поврежденная		Здоровая	Поврежденная	
		<i>Fomes fomentarius</i> , белая гниль	<i>Polyporus betulinus</i> , бурая гниль		<i>Fomes igniarius f. tremulae</i> , белая гниль	<i>Fomes pinicola</i> , бурая гниль
Целлюлоза	44,62	50,14	31,49	48,74	49,39	40,12
Лигнин	18,65	19,74	38,09	20,30	22,34	27,71
Пентозаны	29,76	24,06	17,87	27,64	24,49	21,15
Вещества, экстрагируемые – горячей водой	1,23	5,19	13,89	2,54	3,18	6,12
– этиловым эфиром	1,44	0,72	0,83	0,84	0,80	0,57
Зола	0,31	0,91	0,63	0,40	1,62	0,51
Метоксильные группы	5,71	5,13	7,15	5,60	4,96	5,19
Ацетильные группы	9,54	8,84	10,69	9,16	9,46	–

Т а б л и ц а 2

**Компонентный состав здоровой древесины и подверженной микологическому воздействию**

Древесная порода / Химический состав	Здоровая древесина	Белая гниль	Бурая гниль	Пестрая гниль	Грибная окраска
Влажность, %	12	14	11,5	13,3	12,4
Зольность, %	0,31	0,91	0,63	0,76	0,47
Вещества, растворимые в органических растворителях, %	1,8	4,07	10,68	3,79	2,94
Вещества, растворимые в холодной воде, %	2,2	4,98	12,86	4,05	3,7
Вещества, растворимые в горячей воде, %	2,2	4,19	13,82	4,18	3,91
Содержание целлюлозы, %	41,0	49,84	31,08	45,28	39,97
Содержание пентозанов, %	29,76	24,06	38,09	25,34	28,85
Содержание лигнина, %	18,16	19,92	37,98	21,56	17,56

ти этих грибов появляются преимущественно в заболони в виде различных по размеру и цвету пятен и полос, при этом физико-механические свойства древесины изменяются незначительно.

К основным представителям этой группы грибов относятся:

– дающие красную и розовую (так называемые «краснину» и «розоватость») окраску древесины: гигантская пенифора, *Corticium leae* (розовая или светло-оранжевая окраска, исчезающая при просыхании на свету), грибы рода *Fusarium* (розовые, малиновые и красные тона), а также грибы родов *Penicillium*;

– дающие желтую окраску – «желтизну», грибы родов *Verticillium* и *Trichodepma*

на хвойных породах, проявляющиеся в виде лимонно-желтых или зеленовато-желтых пятен и полос, обычно исчезающих при просушке;

– интенсивно зеленую окраску придает древесине лиственных пород гриб *Chlorosplenium*;

– синеvато-серую и зеленоvато-голубую окраску древесины называют «синеvой». Она вызывается деятельностью многочисленных сумчатых грибов родов *Ophiestoma*, *Ceratostomella* и несовершенных грибов родов *Pullularia*, *Phialophora* и другие;

– гриб *Epicoecum purpurascens* вызывает на хвойной древесине яркие пурпурные поверхностные пятна;

– коричневую, бурую и кофейную окраску, «темнина», дают грибы родов *Diseulu* и *Graphium*;

– серая или почти черная окраска древесины характерна для деятельности гриба *Aspergillus niger*.

В результате процессов гниения изменяется компонентный состав микологически разрушенной древесины и содержание характерных функциональных групп, присущих тем или иным компонентам древесины [2]. Сравнительные данные по компонентному составу здоровой и микологически разрушенной древесины приведены в табл. 1 [3].

В подтверждение данных литературных источников нами были проведены исследования компонентного состава здоровой и микологически разрушенной древесины. Образцы были взяты из березы третьей стадии гниения. Использовались следующие методики: определение влажности гравиметрическим методом, определение зольности древесины, определение веществ, растворимых в органических растворителях, в холодной и горячей воде, определение целлюлозы по методу Кюршнера и Хоффера, определение пентозанов и гексозанов, определение лигнина Класона по методу Комарова.

Результаты исследований представлены в табл. 2. Незначительное отличие полученных данных от данных из литературных источников, связи с тем что образцы были взяты из разных частей дерева и разного возраста.

По результатам исследования было выяснено, что влажность воздушно-сухой древесины, пораженной белой и пестрой гнилью, несколько выше, а бурой – несколько ниже, чем влажность здоровой древесины. По нашему мнению, это объясняется тем, что в компонентном составе белой гнили преобладают полисахариды, обладающие большей гидрофильностью, чем лигнинные компоненты, преобладающие в дереве пораженной бурой. Естественное влагопоглощение при одинаковой влажности воздуха будет наиболее свойственно гидрофильным составляющим белой гнили, нежели гидрофобных бурой гнили. Что же касается образца древесины с грибной окраской, то ее влажность мало отличается от влажности здоровой.

Зольность в биоразрушенной древесине во всех случаях выше, чем у здоровой, но увеличение зольности не может быть изменено под действием микологических факторов, а связано это с интенсивной деструкцией органических компонентов при биоразрушении

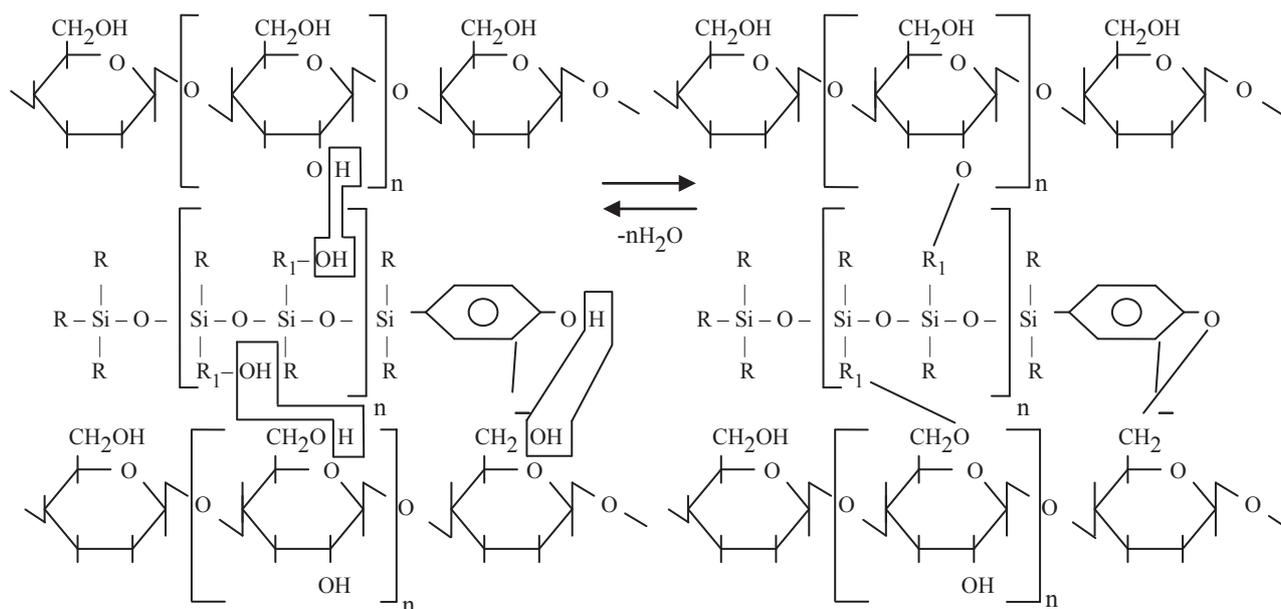


Рис. 2. Взаимодействие целлюлозы с полиорганосилоксаном

древесины и как следствие – относительное увеличение содержание неорганических образующих золу.

Микологическое разрушение древесины приводит к резкому увеличению содержания как водоэкстрактивных веществ, так и веществ, растворимых в спирто-бензольной смеси. Причем суммарное количество водорастворимых веществ несколько выше, чем суммарное количество извлекаемых органикой. Это говорит о том, что в экстрактах преобладает продукты деструкции углеводной части древесины, так как они растворяются как воде, так и в спирто-бензольной смеси, чего нельзя сказать о фенольных продуктах деструкции лигнина растворимых только в органических растворителях. Что же касается сравнения результатов экстракции холодной и горячей водой, то они подтверждают большую интенсивность экстрактивных процессов при повышенных температурах.

Дереворазрушающие грибы, образующие белую гниль, интенсивно разрушают лигнинную часть древесины, бурая же гниль существенно обеднена целлюлозой, за счет ее превращения в низкомолекулярные фрагменты, образующиеся при биодеструкции.

Данные по содержанию пентозанов свидетельствуют о том, что эти компоненты древесины разлагаются как под действием ферментов грибов белой, так и бурой гнили.

Грибы белой гнили незначительно увеличивают относительное содержание лигнина, а грибы бурой гнили увеличивают его содержание практически вдвое за счет интенсивного разложения углеводных компонентов.

Данные по анализу пестрой гнили в большой степени приближены к данным по белой гнили. Что же касается древесины с грибной окраской, то ее компонентный состав приближен к составу здоровой древесины.

Целью этого исследования являлось выяснение возможности использования микологически разрушенной древесины и ее химического модифицирования для последующего изменения тех или иных физико-механических свойств.

В качестве химических модификаторов нами предложено использовать элементоорганические соединения, в первую очередь кремнийорганические нанодисперсии в водных средах, а именно полиорганосилоксаны. Основные физико-механические свойства этих полимеров связаны с высокой гибкостью их макромолекул и относительно малым межмолекулярным взаимодействием [4]. При взаимодействии образцов с полиорганосилоксанами, по предварительным исследованиям, наблюдается повышение физико-механических свойств. При этом сопротивление при сжатии возрастает на 16 %, прочность при статическом изгибе возрастает на 18 %.

При взаимодействии полиорганосилоксана и целлюлозы прослеживается процесс взаимодействия между гидроксильными группами целлюлозы и гидроксилами кремнийорганического состава, обладающими наибольшей активностью. Предполагаемая схема взаимодействия представлена на рис. 2.

Таким образом, проведенные нами предварительные исследования показали возможность и перспективность использования нанодисперсий элементоорганических соединений для улучшения качества микологически разрушенной древесины на ранних стадиях воздействия энзиматических факторов.

### Библиографический список

1. Вакин, А.Т. Пороки древесины / А.Т. Вакин, О.И. Полубояринов, В.А. Соловьев. – М.: Лесная промышленность, 1980. – 112 с.
2. Кононов, Г.Н. Химия древесины и ее основных компонентов / Г.Н. Кононов. – М.: МГУЛ, 2004. – 253 с.
3. Рычкова, А.Г. О химическом составе гнилой древесины березы и осины / А.Г. Рычкова // Журнал прикладной химии. – 1958. – Т.31.
4. Соболевский, М.В. Свойства и области применения кремнийорганических соединений М.В. Соболевский, О.А. Музовская, Г.С. Попелева. – М.: Химия, 1975.
5. Blanchette R.A., Otfen L., Effland M.J., Eslyn W.E. Change in structure and chemical components of wood delignified by fungi // Wood Sci. Technol. – 1985. – Vol. 19.
6. Illman B.L., Highley T.L. Decomposition of wood by brown-rot fungi // Biodeterior. Res., 1989, N 1, P. 1–70.

## ПОЛУЧЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНОЙ ФАНЕРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕРМОАКТИВИРОВАННЫХ НАНОСОРБЕНТОВ

Л.И. БЕЛЬЧИНСКАЯ, *проф. каф. химии ВГЛТА, д-р техн. наук,*  
В.А. ВАРИВОДИН, *асп. каф. химии ВГЛТА,*  
М.В. АНИСИМОВ *асп. каф. химии ВГЛТА*

*chem@vglta.vrn.ru, belbom@mail.ru, bad/89@list.ru*

С каждым годом производство фанеры российскими заводами увеличивается. Если в 2002 г. было изготовлено 1,8 млн м<sup>3</sup> этого материала, то к 2005 г. объемы достигли отметки в 2,6 млн м<sup>3</sup>. Более половины из этого, а именно 1,6 млн м<sup>3</sup>, было отправлено на экспорт.

Прогнозируемый объем годового внутреннего спроса для фанеры в 2011 г. превысит уровень 2001 г. в 1,5–1,7 раза.

В настоящее время при изготовлении фанеры широко используют карбамидоформальдегидные (КФ) клеи, полученные на основе карбамидоформальдегидной смолы, содержащей токсичный формальдегид. Согласно медицинской статистике, следствием превышения допустимой нормы формальдегида в воздухе является рост заболеваемости населения, снижение иммунитета, мутагенное и эмбриологическое действие. Поэтому разрабатываются и внедряются в технологические схемы государственные стандарты и регламенты, соблюдение которых обеспечивает отсутствие прямого или косвенного влияния на здоровье населения и условия его проживания.

Введение в рецептуру наполнителя – адсорбента токсичных соединений приводит к уменьшению эмиссии формальдегида из готовой продукции и клеевой композиции, что существенно улучшит экологическую обстановку в производственных, жилых и офисных помещениях. К таким наполнителям относятся дешевый природный цеолит и достаточно дорогой искусственный кремнезем аэросил, широко применяемый в мебельной промышленности как загуститель и в виде тиксотропной добавки [1].

Одним из представителей природных цеолитов является клиноптилолит, обладающий нанопористой структурой и имеющий активные центры различной природы: неэк-

ранированные или частично экранированные катионы, комплексы из многозарядного катиона и гидроксильных групп, брэнстедовские и льюисовские кислотные центры, мостиковые атомы кислорода, дефекты кристаллической структуры. Для сорбционных процессов определяющими являются размеры и расположение каналов. Кроме каналов, цеолитные каркасы содержат пустоты, образующие совместно с каналами полиэдры, внутри которых имеются свободные объемы размерами 0,6–1,1 нм. В структуре клиноптилолита имеется 4 типа каналов эллиптического сечения. Размеры десятичных каналов равны 0,705·0,395, а восьмичленных – 0,46·0,395 нм. Матрица клиноптилолита – каркасная открытая, с расположением обменных ионов в открытых полостях и каналах [2].

Проводились сравнительные исследования адсорбции формальдегида на искусственном кремнеземе – аэросиле. Он представляет собой очень чистую аморфную непористую двуокись кремния с размером частиц от 4 до 40 нм. Активными адсорбционными центрами аэросила являются многочисленные поверхностные группы = SiOH, поэтому аэросил обладает хорошими адсорбционными свойствами. Он имеет обширное применение в мебельной промышленности. В электрическом поле частицы аэросила направлены к положительному полюсу, т.к. они имеют отрицательный заряд вследствие гидроксильности поверхности [3].

Цель данной работы – исследование сорбционных способностей термоактивированных клиноптилолита и аэросила, из отвержденной клеевой композиции и изделий на ее основе, оценка влияния исследуемых сорбентов на физико-механические свойства полученной фанеры. По результатам этих исследований возможны рекомендации по

Рецептура исследуемых смол

№ образца	Клей, мас. ч.	Отвердитель хлорид аммония, мас. ч.	Наполнитель 1, мас.ч.	Наполнитель 2, мас.ч.
1	KRONORES CB 1100 (100)	0,8	–	–
2	KRONORES CB 1100 (100)	0,8	–	Клиноптилолит (2)
3	Смола КФ-Н66Ф (100)	0,6	–	–
4	Смола КФ-Н66Ф (100)	0,6	Каолин (10)	–
5	Смола КФ-Н66Ф (100)	0,6	Каолин (7,8)	Клиноптилолит (2,2)
6	Смола КФ-Н66Ф (100)	0,6	Каолин (7,8)	Аэросил (2,2)

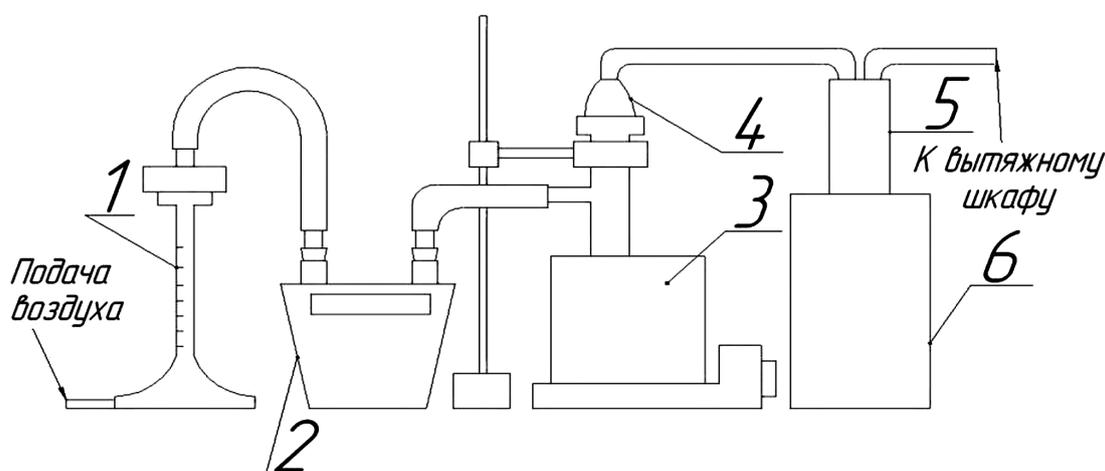


Рис. 1. Установка для определения эмиссии формальдегида из клеевой композиции: 1 – детектор давления; 2 – газовый счетчик; 3 – водяная баня; 4 – колба с испытуемым порошком; 5 – колба с дистиллированной водой; 6 – емкость с холодной водой

внедрению новой клеевой композиции для изготовления экологичной фанеры.

### Методика проведения исследований

С целью повышения сорбционной емкости исследуемые сорбенты подвергали предварительной термообработке. При этом происходит десорбция физически связанной воды как с поверхности кристалла, так и из цеолитных каналов. Термообработку проводили в сушильном шкафу. Определен температурный режим активации для клиноптилолита 453 К [4], для аэросила – 423 К [3]. Время термоактивации определено ранее в работе [5] и равно одному часу.

Для получения модифицированной клеевой композиции использовали рецептуру

клеев, приведенную в табл. 1. При этом использовались импортный клей KRONORES CB 1100 и отечественная смола КФ-Н66Ф.

Хлористый аммоний ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ), вводимый в клеевую композицию, традиционно играет роль отвердителя при использовании клеевых композиций горячего способа отверждения.

Отвержденную композицию в течение суток выдерживали при 293 К, затем размельчали до получения фракции 0,5 мм [6].

Исследование эмиссии свободного формальдегида из отвержденного клея проводили фотоколориметрически ацетилацетонным методом [9].

Полученный порошок в количестве 10 г помещали в колбу (4) и нагревали на водя-

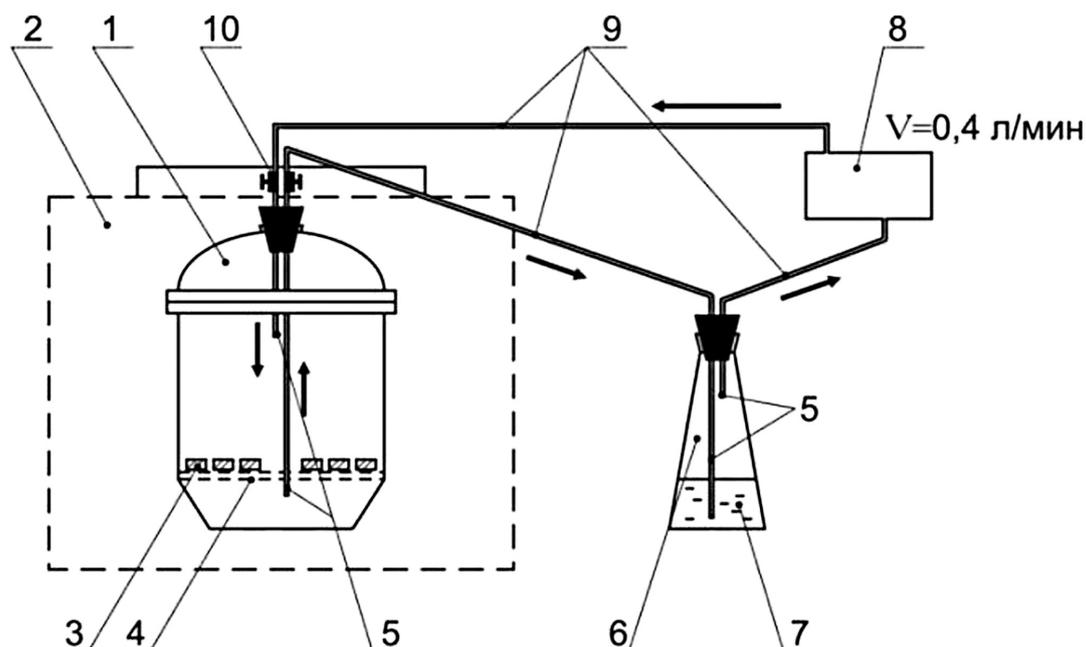


Рис. 2. Схема лабораторной установки для определения формальдегида: 1 – эксикатор с отверстием в крышке; 2 – термостат; 3 – образцы; 4 – керамический круг с отверстиями; 5 – стеклянные трубки; 6 – коническая колба; 7 – вода; 8 – компрессор; 9 – латексные трубки; 10 – зажимы

ной бане (3). Колбу герметично соединяли с сосудом (5), в котором находилось 70 мл дистиллированной воды. Этот сосуд помещали в емкость (6) с холодной водой. Через колбу с порошком пропускали 50 л воздуха со скоростью 1 л/мин. Воздух проходил через детектор давления (1) и газовый счетчик (2), а затем через дистиллированную воду. Через 50 мин из сосуда с раствором формальдегида отбирали 10 мл раствора, добавляли 10 мл ацетилацетона и 10 мл ацетата аммония. Концентрацию свободного формальдегида определяли фотоколориметрически ацетилацетоновым методом (чувствительность 0,001 мг/дм<sup>3</sup>) при длине волны  $\lambda = 412$  нм.

Определение эмиссии формальдегида из фанеры проводили на лабораторной установке, представленной на рис. 2. Выделение свободного формальдегида из фанеры с помощью камерного (образец 12) [9] и эксикаторного (образцы 3–6) методов.

Основная цель применения данного лабораторного метода – оценка токсичности фанеры. Он может быть использован и при испытании клеевых композиций для изготовления других клеевых древесных материалов и плит с помощью простого эксперимента, близкого к реальным условиям. Образцы фа-

неры (9) размером 25 × 25 мм определенной толщины помещали в эксикатор (1) объемом 4 л и выдерживали в течение 48 ч без доступа воздуха извне. Эксикатор термостатировали при температуре  $T = 293$  К. Через 48 ч к системе подсоединяли коническую колбу объемом 250 мл с дистиллированной водой. Объем воды в колбе определяется концентрацией формальдегида. При снятии зажимов, которые были закреплены на трубках, идущих от эксикатора, система замыкается. Свежий воздух в систему дополнительно не подавали, анализ продолжали с этим же воздухом. При помощи компрессора (3) воздух циркулирует в системе по замкнутому кругу.

Формальдегид, выделившийся из образцов фанеры (9), с помощью компрессора пропускаться через дистиллированную воду, где он растворялся. Через 1 час компрессор включался и с помощью зажимов прекращался доступ воздуха в коническую колбу. В течение 15 мин колба должна быть закрыта для достижения полного растворения формальдегида в воде. Затем колба отсоединялась от установки и закрывалась притертой крышкой.

Результаты исследований токсичности клеевой композиции и фанеры приведены в табл. 2.

**Эмиссия формальдегида из клеевой композиции и фанеры**

Образец	Эмиссия формальдегида из клеевой композиции		Эмиссия формальдегида из фанеры	
	$C_{\text{CH}_2=\text{O}}$ , мг/г	Снижение эмиссии, %	$C_{\text{CH}_2=\text{O}}$ , мг/г	Снижение эмиссии, %
KRONORES CB 1100	0,082	–	0,124	–
KRONORES CB 1100 с 2 мас.ч. клиноптилолита	0,071	14	0,077	38
Смола КФ-Н66Ф	0,133	–	–	–
Смола КФ-Н66Ф с 10 мас.ч. каолина	0,128	4	0,19	–
Смола КФ-Н66Ф с 7,8 мас.ч. каолина и 2,2 мас.ч. клиноптилолита	0,113	15	0,132	31
Смола КФ-Н66Ф с 7,8 мас.ч. каолина и 2,2 мас.ч. аэросила	0,09	32	0,115	40

**Результаты испытаний образцов на скалывание по клеевому слою**

Образец	Образец 4*	Образец 5	Образец 6
Предел прочности при скалывании, МПа	1,11	1,44	1,79

\*нумерация образцов из табл. 1

Таким образом, введение в клеевую композицию термоактивированного клиноптилолита способствует снижению эмиссии формальдегида из нее на 15 %, а из готовой фанеры на 31 %, в сравнении с клеевой композицией, используемой на предприятии в качестве рабочей (смола КФ-Н66Ф + 10 мас.ч. каолина). Введение аэросила приводит к снижению эмиссии из клеевой композиции на 32 %, а из готовой фанеры на 40 %, при сравнении с тем же контрольным образцом – рабочей композицией предприятия (табл. 2).

Для полученных материалов проводились физико-механические испытания по ГОСТ 9621-94 определению предела прочности при скалывании, по методикам, представленным в работе [7].

Как следует из этих данных, происходит не только снижение выделения формальдегида из готового материала, но и увеличение его предела прочности при скалывании.

Добавление термоактивированных сорбентов-наполнителей – клиноптилолита или аэросила приводит к увеличению предела прочности фанеры при скалывании по клеевому слою (табл. 3). В сравнении с рабочей клеевой композицией предприятия введение клиноптилолита увеличивает этот показатель

в 1,29 раза, аэросила – в 1,6 раза. В случае с клиноптилолитом это может быть связано с более прочной кристаллической решеткой по сравнению с каолином, для аэросила – по всей видимости, это вызвано его мелкодисперсным строением. Для обоих наполнителей, вероятно, сказывается и факт образования большего количества связей со свободным формальдегидом в клеевой композиции, тем самым происходит дополнительная «сшивка» получаемого материала.

**Разработка технологии производства экологически безопасной фанеры**

Применение разработанной технологии заключается во внесении изменений в технологический процесс изготовления материала. Они касаются процесса приготовления связующего, а именно изменения его рецептуры. Для этого необходимо введение предварительно термоактивированного наполнителя-адсорбента. В связи с этим в технологическую цепь необходимо добавить промышленный термостат и столы для загрузки-выгрузки сорбента, а также специальные заградительные устройства, препятствующие доступу воздуха к охлаждаемому сорбенту. Отличительной особенностью процесса приготовления мо-

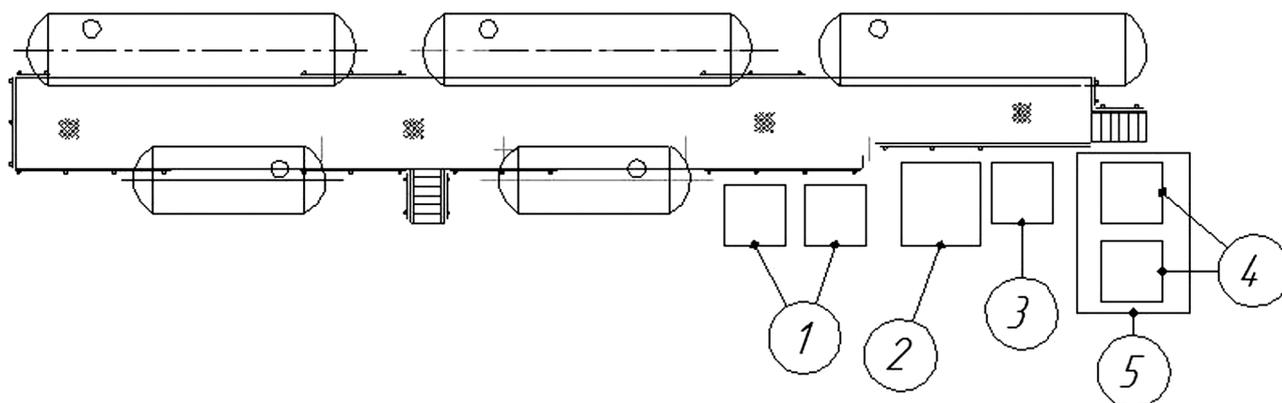


Рис. 3. Примерная схема модернизации клееприготовительного отделения: 1 – загрузочные столы; 2 – промышленный термостат; 3 – стол с подносами; 4 – разгрузочные столы; 5 – защитные экраны

дифицированного связующего заключается в том, что процесс термообработки осуществляется в течение 1 ч при температуре 150 °С для аэросила и при 180 °С для клиноптилолита, а также дальнейшего охлаждения наполнителя до температуры 20 °С для введения в клеящую композицию. Процесс охлаждения должен происходить в минимальные сроки или с ограниченным (или без) доступом воздуха, так как в это время происходит адсорбция паров воды из окружающего воздуха, что ухудшает работу адсорбента в клеящей композиции. Охлаждение необходимо для исключения процесса преждевременного отверждения клеящей композиции при введении горячего сорбента, что приводит к неисправностям оборудования клееподдачи. Поэтому целесообразно заранее начинать процесс активации сорбента, чтобы обеспечить его готовность к моменту начала приготовления клеящей композиции. Из числа исследуемых образцов клея для производства рекомендуется следующая рецептура: смола КФ-Н66Ф – 100 мас.ч., каолин – 7,8 мас.ч., клиноптилолит – 2,2 мас.ч., хлористый аммоний – 0,6 мас.ч. Схема модернизации клееприготовительного отделения представлена на рис. 3.

Схема на рис. 3 иллюстрирует возможное расположение необходимого оборудования для термоактивации сорбента и отсутствие необходимости в отдельном помещении для реализации данной технологии.

### Выводы

1) Определено снижение эмиссии свободного формальдегида из клея марки

KRONORES CB 1100 и клеящей композиции на основе карбамидоформальдегидной смолы КФ-Н66Ф при введении в них предварительно термообработанного природного минерала клиноптилолита или искусственного кремнезема аэросила. Установлено, что аэросил обеспечивает снижение эмиссии формальдегида из клеящей композиции на 32 %, из фанеры – на 40 %. При добавлении клиноптилолита выделение формальдегида уменьшается на 15 % для клея KRONORES CB 1100 и на 14 % для смолы КФ-Н66Ф, из фанеры – на 38 % и 32 % соответственно. Стоимость аэросила значительно больше стоимости клиноптилолита, следовательно, по соотношению «эффективность–стоимость» использование клиноптилолита целесообразнее.

2) При испытании фанеры на скалывание по клеящему слою видно, что введение в рецептуру клея 2,2 мас.ч. клиноптилолита способствует увеличению предела прочности в 1,29 раза, а добавление такого же количества аэросила способствует увеличению предела прочности в 1,6 раза. Введение наполнителя, выполняющего функцию адсорбента, обеспечивает улучшение экологичности плитных материалов и их прочностных характеристик. Поэтому целесообразно предложить для использования в производстве одну из исследуемых рецептур клеящих композиций, а именно образец 5 – ввиду наилучшего сочетания цена – токсичность – физико-механические показатели.

3) Разработанная технология отличается малыми экономическими затратами и

трудоемкостью технологического процесса производства экологически безопасных материалов.

### Библиографический список

1. Цицишвили, В.Г. Пористость и адсорбционные свойства высококремнистых и сверхвысококремнистых цеолитов: в кн. Адсорбция и адсорбенты, Тр. IV Всесоюзной конференции по теоретическим вопросам адсорбции / В.Г. Цицишвили. – М.: Наука, 1987. – С. 215–220.
2. Челищев, Н.Ф. Цеолиты – новый тип минерального сырья / Н.Ф. Челищев, Б.Г. Беренштейн, В.Ф. Володин. – М.: Недра, 1987. – 176 с.
3. Манченко, Л.В. Аэросил, его свойства, применение и технические условия / Л.В. Манченко. – Львов: Каменер, 1965. – 34 с.
4. Бельчинская, Л.И. Снижение эмиссии формальдегида из карбамидоформальдегидных клеев при введении клиноптилолитового наполнителя / Л.И. Бельчинская, Я. Седлячик, Н.А. Ходосова, М.В. Анисимов // Современные технологические процессы получения материалов и изделий из древесины: матер. Междунар. науч.-техн. конференции, посвященной 50-летию факультета технологии деревообработки ВГЛТА (17–21 мая 2010 г.) под ред. проф. А.О. Сафонова. – Воронеж, 2010. – С. 338–342.
5. Шабельский, В.В. Защита окружающей среды при производстве лакокрасочных покрытий / В.В. Шабельский, В.М. Андреенок, Н.З. Евтюков. – Л.: Химия, 1985. – 120с.
6. Бельчинская, Л.И. Природозащитная технология обезвреживания и утилизации отходов мебельных производств: монография / Л. И. Бельчинская. – Воронеж: ВГЛТА, 2002. – 210 с.
7. Разиньков, Е.М. Технология клееных материалов и древесных плит. Изготовление и испытание материалов: метод. указание / Е.М. Разиньков, В.С. Мурзин, О.В. Лавлинская. – Воронеж: ВГЛТА, 2007. – 52 с.
8. ГОСТ 9621-94. Древесина слоистая клееная. Методы определения физических свойств. –М.: Изд-во стандартов, 1994.
9. Liptáková, E. *Chémia a aplikácie pomocných látok v drevárskom priemysle* / Eva Liptáková, Milan Sedliak. – Bratislava, 1989. – 520 с.

## НАНОСЕНСОРНЫЙ АНАЛИЗ ЛЕТУЧИХ КОМПОНЕНТОВ ДЛЯ ДИФФЕРЕНЦИАЦИИ ОБЪЕКТОВ РАСТИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

А.В. БОГДАНОВА, *асп. ВНИИМП им. В.М. Горбатова,*  
Т.Г. КУЗНЕЦОВА, *зав. лаб. квалиметрии ВНИИМП им. В.М. Горбатова, д-р вет. наук,*  
А.Н. ИВАНКИН, *проф. каф. химии и биотехнологии МГУЛ, д-р хим. наук*

*aivankin@mgul.ac.ru*

Запах является важнейшим показателем состояния объектов окружающей среды, который формируется комплексом летучих веществ. Компонентами запаха выступают разнообразные химические вещества, представленные в виде парогазовой смеси, прежде всего ароматических соединений, терпенов, альдегидов, эфиров и множества других компонентов [5].

Запах является важной характеристикой, позволяющей судить о происхождении данного объекта, его состоянии, продолжительности хранения, принадлежности к конкретному сорту, виду или роду [1, 6].

Традиционно обоняние позволяет живым существам различать запахи и объекты, с ним связанные, однако необходимость документирования данной информации, а также

важность использования неких общедоступных и независимых способов оценки запахов привели к созданию технических устройств, формирующих аналитический сигнал на химические компоненты запаха [2, 7].

Одним из устройств, позволяющих быстро анализировать запахи и соотносить их с конкретными материалами, является мультинаносенсорная система «электронный нос» [3, 8, 9]. Это анализатор паров или газов на основе разнородных наносенсоров. Электронный нос состоит из физических, химических и электронных сенсоров. Такие системы имитируют человеческий нос, прослеживая взаимосвязь между летучими компонентами в зоне действия сенсоров. Принцип действия электронного носа основан на способности улавливать сенсорами выделяющиеся с поверхности про-

бы летучие компоненты. Схематически работу электронного носа можно представить следующим образом: проба, ее анализ сенсорами электронного носа, затем преобразование физико-химического сигнала сенсоров в электронный сигнал, далее анализ результатов с помощью математических методов и получение окончательных данных. За счет комбинирования сенсоров в приборе можно целенаправленно использовать преимущества отдельных сенсоров и достичь более точной дифференциации полученных результатов [7].

В работе использовали прибор «VOCmeter» (рис. 1) фирмы «AppliedSensor» (Германия), разработанный для оценки свежести пищевой продукции, прежде всего на основе животного сырья [3, 8]. «VOCmeter» представляет собой систему, содержащую четыре сенсора MOS, обозначаемые как MOS1–MOS4 (металлооксидные наносенсоры) и восемь сенсоров QMB марки Q1–Q8 (кварцевые микробалансные сенсоры).

Прибор предназначен для проведения качественной и количественной оценки газовых смесей [8]. Система обеспечивает в автоматическом режиме получение узнаваемого образа смеси паров пахучих веществ, по ко-

торому можно различать природные объекты растительного, животного и иного происхождения. Основным компонентом системы являются наносенсоры, на поверхности которых на молекулярном уровне могут располагаться молекулы разной химической природы. Каждый сенсор обладает разной чувствительностью к анализируемым веществам и имеет свой специфический профиль откликов на тестируемые запахи [4]. Главная особенность наносенсорной системы – способность преобразовывать в сигнал факт «попадания» конкретного вещества на поверхность нанодатчиков, работающих по принципу контактного выключателя. Сигнал пропорционален площади, «занимаемой анализируемыми молекулами». Функция сенсоров MOS основана на возникновении окислительно-восстановительных реакций при осаждении анализируемых молекул на чувствительном слое, что вызывает изменение его сопротивления. Работа сенсоров QMB основана на измерении частоты колебания полимерной пластинки. При прохождении аналитического газа через область сенсоров исследуемые компоненты осаждаются на поверхности чувствительного слоя, что приводит к увеличению массы пластинки и частоты ее колебаний, зависящих от объема исследуемых молекул, абсорбируемых на поверхности полимерного матрикса.

При прохождении анализируемого газа над поверхностью сенсоров прибора «VOCmeter» происходящие в чувствительном слое наносенсора физико-химические изменения с помощью преобразователя превращаются в электронный сигнал, который передается на персональный компьютер.

Для экспериментальных исследований использовали опилки древесных пород (сосны кедровой, березы и бука), травяных культур (укроп, клевер) с частицами до 2 мм, которые помещали в пенициллиновые флаконы вместимостью 20 см<sup>3</sup>. Флаконы герметично укупоривали резиновыми пробками с алюминиевыми колпачками при помощи кламмера и устанавливали в штатив прибора. После включения автоматической программы анализа содержимое флаконов подогревалось до температуры 60–80 °С и через пробку ав-



Рис. 1. Прибор «VOCmeter»

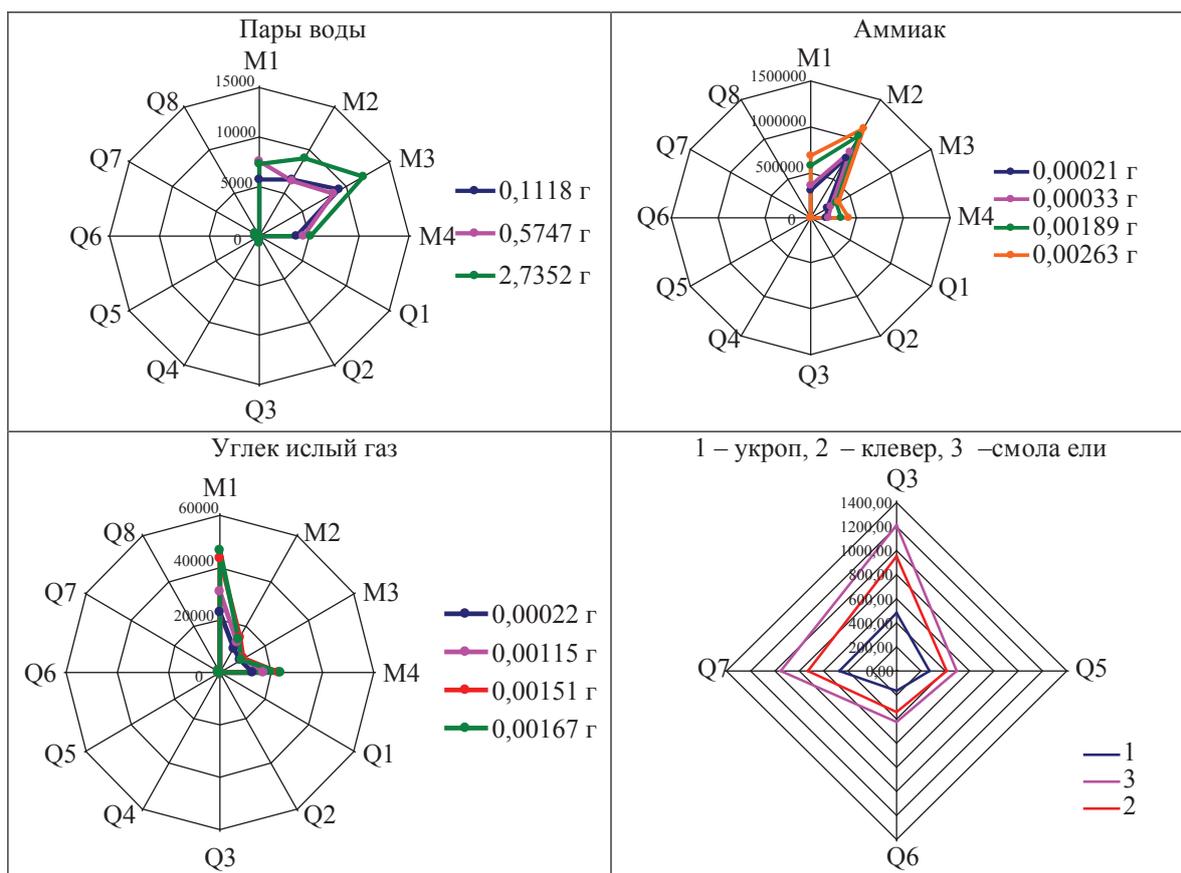


Рис. 2. Отклики сигналов разных веществ

томатически осуществлялось введение иглы, через которую газовая смесь подавалась в сенсорный блок. Для градуировки прибора по избранным компонентам во флаконы вводили по 10 мкл жидких образцов (вода, 20 % раствор аммиака) или имитировали получение газовой среды во флаконе за счет соответствующей химической реакции, например, для формирования среды углекислого газа во флаконе к 100 мг мела прикапывали 50 мкл 10 %-го раствора соляной кислоты.

Расчет данных методом главных компонент осуществляли автоматически с использованием программного обеспечения *Argus*. Время исследования одного образца – 30 мин.

На рис. 2 приведены отклики сигналов разных веществ.

Видно, как простые компоненты (вода,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CO}_2$ ), так и более сложные виды объектов окружающей среды (ароматизатор – укроп, листья клевера, смола ели) имеют совершенно разные, весьма характерные отклики наносенсоров. Лепестковые диаграммы (визуальные отпечатки) исследуемых образцов

1–3, построенные по показаниям сенсоров MOS, позволили рассчитать по методу главных компонент относительные площади сигналов, которые составили соответственно  $S_{\text{во}} \cdot 10^8$ ,  $(1/\text{Om})^2$ : 1261,60, 14,05 и 32,70. Расчетные концентрации в условиях экспериментов составляли от 0,001 до 5 мкг/мл.

Представленные на рис. 2 данные основных сигналов датчиков показывают, что выявленные основные, наиболее чувствительные датчики Q3 и Q7, являются реперными, по которым можно построить градуировку, например, для смеси 10, 20, 50 и 100 % одного сорта растений в смеси с другим сортом. После получения соответствующих значений сигналов по методу главных компонент можно далее судить об условном количестве примеси второго растения к первому. То есть речь идет о методе установления фальсификации или некачественной сортировки растительной продукции.

Таким образом, расшифровка сигналов по известным смесям веществ позволяет надежно соотносить полученные комплекс-

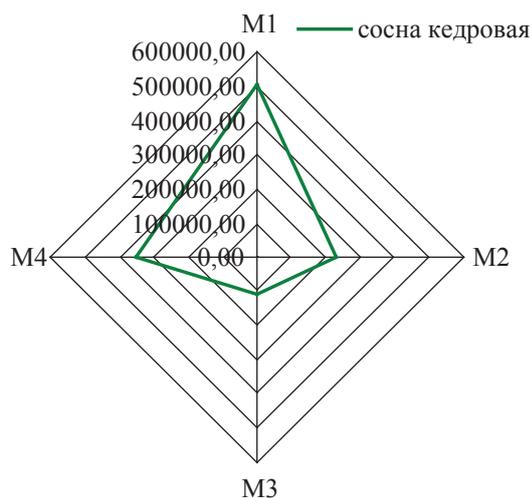


Рис. 3. Визуальный отпечаток (MOS)

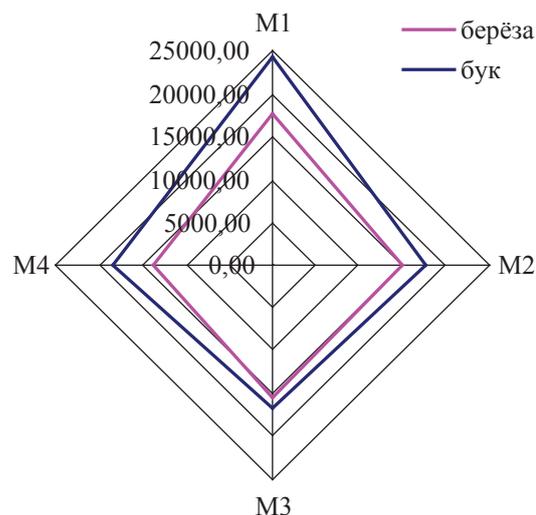


Рис. 4. Визуальные отпечатки (MOS) образца сосны кедровой образцов берёзы и бука

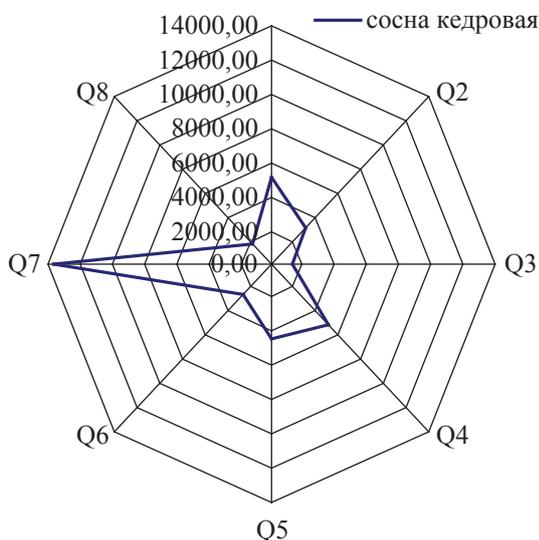


Рис. 5 Отпечатки (QMB) сосны кедровой

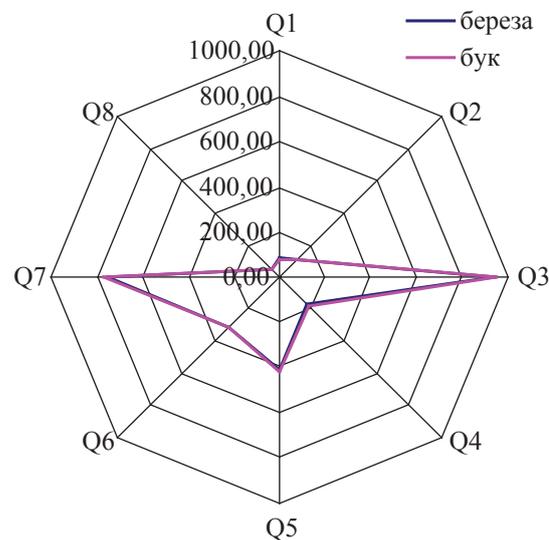


Рис. 6 Отпечатки (QMB) образцов берёзы и бука

ные сигналы с видами продукции различного происхождения.

Представляло интерес определить возможность применения данной аналитической системы для дифференциации пород древесины. Эта задача является достаточно сложной, особенно в случае рассмотрения образцов малых размеров или опилок, которые по внешнему виду могут быть неотличимы.

На рис. 3–6 представлены значения основных сенсоров M1–M4 и Q1–Q8, использованных для дальнейшей дифференциации по методу главных компонент. Результат расчета показан на рис. 7.

Для количественного и качественного измерения отклика летучих компонентов ана-

литического газа использовались наиболее значимые сигналы сенсоров  $MOS_1$ – $MOS_4$ , результаты обработки которых методом главных компонент с помощью компьютерной программы «Argus» могут быть представлены координатными коэффициентами PC1 и PC2. Метод главных компонент базируется на построении факторов – главных компонент, каждый из которых представляет линейную комбинацию исходных признаков. Первая главная компонента PC1 определяет такое направление в пространстве исходных признаков, по которому совокупность объектов (точек) имеет наибольший разброс (дисперсию). Вторая главная компонента PC2 строится с таким расчетом, чтобы ее направление

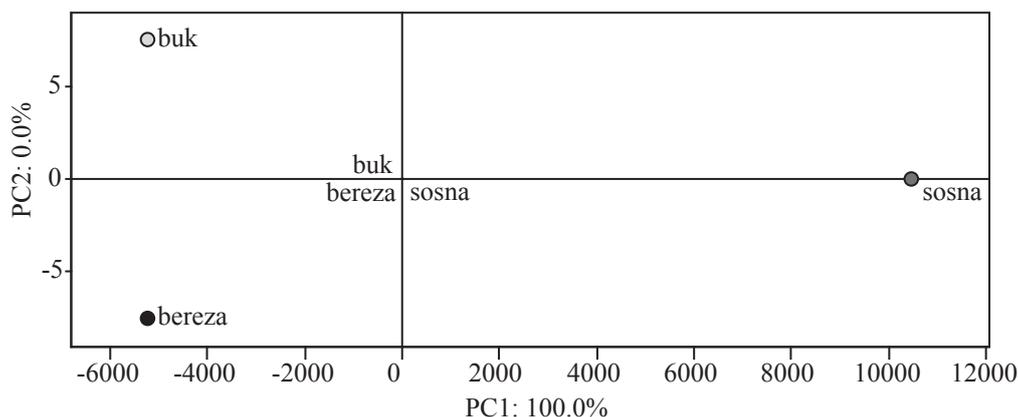


Рис. 7. Распознавание образцов бука, березы и ели с использованием наносенсоров, сигналы которых рассчитаны автоматически по методу главных компонент

было ортогонально направлению PC1 и она охватывала как можно большую часть остаточной дисперсии. Так как выделение главных компонент происходит в убывающем порядке с точки зрения доли охватываемой ими дисперсии, то признаки, входящие в первую главную компоненту с большими коэффициентами оказывают максимальное влияние на дифференциацию изучаемых объектов.

При обработке методом главных компонент полученных показаний сенсоров прибора установлены границы главной компоненты, соответствующие каждой категории древесных пород.

Из рис. 7 видно, что образцу бука следует приписать условное число с координатами +7,5 и -5100, для березы -7,5 и -5250, для сосны 0 и +10500. Значения контрольных чисел для образцов древесины, взятых из разных мест по стволу дерева, группировались в указанных зонах с отклонениями не более  $\pm 15\%$ .

Для окончательной идентификации видовой принадлежности исследуемых образцов древесных пород, их по завершении анализа на приборе «VOCmeter», сравнивали с калибровочным графиком, имеющимся в компьютерной программе «Argus». Принадлежность конкретной точки к определенному кластеру позволяла проводить идентификацию видовой принадлежности исследуемого образца.

Таким образом, представленные данные подтверждают принципиальную возможность использования мультисенсорной системы нанодатчиков для того, чтобы различать объекты растительного происхождения. Сис-

тема VOCmeter позволяет надежно идентифицировать образцы лиственных древесных пород, отличая их от хвойных, а также различать лиственные породы между собой.

### Библиографический список

1. Дедерер И. Применение сенсоров «электронный нос» для контроля качества мяса / И. Дедерер. – Кульмбах, Германия: Федеральный центр по исследованию мяса, 2003. – 26 с.
2. Анисимкин В.И. Интегральная решетка датчиков для анализа многокомпонентных газовых смесей / В.И. Анисимкин, Э. Верона, В.Е. Земляков, Р.Г. Крышталь, А.В. Медведь // Письма в журнал технической физики. – 1998. – Т. 24. – № 16. – С. 40–46.
3. Чернуха И.М. Использование прибора VOC-meter для определения свежести мяса / И.М. Чернуха, Т.Г. Кузнецова, Е.Б. Селиванова, А.Н. Иванкин // Мясная индустрия. – 2008. – № 3. – С. 49–52.
4. Электронный нос проводит точный химический анализ. // Нано- и микросенсорная техника. – 2006. – № 7. – С. 63–70.
5. Tanaka Y., Nakamoto T., Moriizumi T. Study of highly sensitive smell sensing system using gas detector tube combined with optical sensor // Sensors and Actuators B: Chemical. – 2006. – V. 119. – N1. – P. 84 – 88.
6. Lee J.H. Gas sensors using hierarchical and hollow oxide nanostructures. Review. // Sensors and Actuators B: Chemical. – 2009. – V. – 140. – N 1. – P. 319 – 336.
7. Azeredo H.M.C. Nanocomposites for food packaging applications. Review Food Research International. – 2009. – V. 42. – N 9. – P. 1240–1253.
8. Manual VOCmeter systems, version 1.0, AppliedSensor GmbH. 01.05.2000.
9. Semenova A.A., Kuznetsova T.G., Bogdanova A.V., Ivankin A.N. Study on the influence of low temperature treatment of meat raw material on the volatile components composition by multisensor analysis and chromatomasspectrometry // Proc. The 57-th Int. Congr. of Meat Sci. and Technol. Aug., 2011, Belgium. – P.179.

## НАНОЦЕЛЛЮЛОЗА И ПОЛУЧЕНИЕ БУМАГИ НА ЕЕ ОСНОВЕ

О.П. ПРОШИНА, доц. каф. химии и биотехнологии МГУЛ, канд. хим. наук,  
Г.Л. ОЛИФЕРЕНКО, доц. каф. химии и биотехнологии МГУЛ, канд. хим. наук,  
Ю.М. ЕВДОКИМОВ, проф. каф. химии и биотехнологии МГУЛ, канд. хим. наук,  
А.Н. ИВАНКИН, проф. каф. химии и биотехнологии МГУЛ, д-р хим. наук

*aivankin@mgul.ac.ru*

Целлюлоза является основным укрепляющим компонентом растительных клеток, в частности клеточных стенок. Целлюлозные включения в клетках представлены в виде поли- $\beta$ (1,4)-D-глюканов, формирующих микрофибриллы, которые имеют поперечный размер обычно 5–10 нм, в зависимости от вида растительного источника, и длину несколько микрометров. Эти образования имеют очень высокие физико-механические характеристики. Целлюлоза, извлеченная из растительного сырья, может иметь частицы различной формы и размеров, специальные приемы переработки растительного сырья позволяют получать наноцеллюлозу в виде волокон диаметром 20–40 нм и длиной 200–400 нм [6, 7].

Целлюлоза является одним из самых распространенных материалов, извлекаемых из растений и древесины. Чтобы полностью реализовать потенциал целлюлозы как прочняющего природного материала, перспективным является использование ее в качестве именно наноструктурированных фибрилл – т.е. в той форме, в которой существование целлюлозы предопределено природой. Важность целлюлозы в виде нанофибрилл была продемонстрирована на примере получения полимерных композитов [7, 8].

Целлюлоза является основой изделий из бумаги, многих тканых материалов и специальных покрытий с сорбционными свойствами. Широкое применение целлюлозы основано на ее доступности и высоких прочностных свойствах. В последние годы в научной литературе появились сообщения о различных способах получения технической наноцеллюлозы. В этих работах обычно используется сочетание механического воздействия на растительное сырье и последующей, как правило, мягкой ферментативной

обработки, приводящей к снижению молекулярной массы целлюлозы.

Ранее нами было показано, что сочетание ферментативной и химической обработки сырья природного происхождения является достаточно универсальным способом деградации природных биополимеров до фрагментов нужных размеров. Деградируемые фрагменты пептидной, липидной или углеводной природы могут в дальнейшем использоваться на практике, при этом частицы таких фрагментов могут быть достаточно малыми, что позволяет получать на их основе новые материалы с существенно отличающимися свойствами [2].

Цель данного исследования заключалась в получении наноразмерной целлюлозы и оценке ее физико-механических свойств в составе бумажной композиции.

### Экспериментальная часть

В работе использовали древесную целлюлозу, которую извлекали из бумажной массы. Для этого бумагу писчую, плотностью 80 г/м<sup>2</sup> марки «Снегурочка» смешивали 1:10 с водой и подвергали механической обработке на измельчителе тканей РТ-2, обеспечивающем гомогенизацию бумажной пульпы при вращении режущей мешалки со скоростью 5000 об/мин в течение 1 ч. Полученную суспензию подвергали дополнительной гидролитической обработке ферментативным и химическим путем.

Для проведения ферментативной обработки применяли полиферментный препарат панкреатин [1]. Использовали фармакопейный панкреатин с общей протеолитической активностью 12500 ед./мг, липолитической активностью 1000 ед./мг и амилолитической активностью 12000 ед./мг [5].

Оптимальными условиями ферментативной обработки были: рН 6,8, температура

40°C, время 6 ч при концентрации фермента 2 % по отношению к сухой массе сырья. В этих условиях степень конверсии составляла около 10–15 %. Процесс гидролиза целлюлозы контролировали путем определения массовой доли редуцирующих сахаров, высвобождающихся из макромолекул целлюлозы в результате ее ферментативного расщепления [2, 5].

Поскольку мягкий ферментативный гидролиз целлюлозы из бумаги в присутствии панкреатина не приводит с существенной конверсии, далее применяли кислотный гидролиз, который осуществляли в среде 1 М серной кислоты путем обработки 10 % водной суспензии целлюлозы, полученной после ферментативного расщепления при 80 °С в течение 3 ч.

Размер частиц оценивали при помощи оптического микроскопа «Jenaval» Carl Zeiss (Германия) – объектив  $\times 40$ , с использованием видео-компьютерной системы анализа изображения «ВидеоТест Морфология 4,0», позволяющего наблюдать объекты с минимальным размером частиц  $>100$  нм (0,1 мкм), а также оптическим методом светорассеивания по Рэлею.

Для этого полученную по технологии 10–20 %-ю в/м микроэмульсию разбавляли водой, приготавливая при интенсивном перемешивании 4 разбавления: аликвота 10 мкл + 20 мл воды (1 : 2000), + 50 мкл воды (1 : 5000), + 100 мл воды (1 : 10000) и далее измеряли экстинкцию приготовленных разбавленных эмульсий при 546 нм на фотометре ЕСОМ (Erpendorf, Германия) в кювете с толщиной оптического слоя в 1 см. Расчет по формуле Рэлея. В данном случае для контроля размеров целлюлозных нанокластеров использовали турбодиметрический метод Рэлея, позволяющий по спектральным характеристикам дисперсной системы оценивать линейные размеры частиц в жидкой системе [2].

Для суспензии со сферическими частицами уравнение Рэлея можно написать в виде  $I_p/I_o = 24\pi^3/\lambda^4 \cdot [(n_1^2 - n_2^2)/(n_1^2 + n_2^2)]^2 \cdot C_{об} \cdot V$ , где:  $I_p$  – полная интенсивность света, рассеянного 1 см<sup>3</sup> системы в 1 сек;  $\lambda$  – длина волны света, см;  $n_1$  – показатель преломления дисперсной

фазы, который равен 1,333;  $n_2$  – показатель преломления дисперсионной фазы (принимали равным как среднее значение из выборки 1,3 – 1,7;  $n_D^{20} = 1,5$ );  $C_{об}$  – объемная доля дисперсной фазы;  $V$  – объем частицы, см<sup>3</sup>. Учитывая, что мутность  $\tau = I_p / I_o$  численно равна световой энергии, рассеиваемой 1 см<sup>3</sup> раствора во всех направлениях, а также то, что уравнение Рэлея выполняется для очень разбавленных систем,  $[\tau] = \lim (\tau/C_{об}), C_{об} \rightarrow 0$  в работе использовали разбавленные медно-аммиачные дисперсии 1 : 2000...1 : 10000 при  $\lambda = 620$  нм для построения зависимостей соотношений  $\tau / C_{об}$  от  $C_{об}$ . В данных координатах экстраполяцией при  $C_{об} \rightarrow 0$  устанавливали  $\tau/C_{об}$  и далее вычисляли приблизительный диаметр изучаемых частиц так, как это описано в работах [2, 3].

Для параллельной оценки состояния целлюлозы в процессе гидролитической обработки использовали известный вискозиметрический метод контроля молекулярной массы в 1 г/л медно-аммиачном растворе при 20°C, содержащего (г/л): меди  $Cu^{2+}$  – 15,  $NH_3$  – 200, сахарозы – 2. Пересчет зависимости характеристической вязкости  $[\eta]$  и молекулярной массы  $M$  по уравнению Марка-Хаувинка-Куна  $[\eta] = M^{0,9}$  [4].

Прочность на разрыв оценивали на разрывной машине SZ-51-01.

### Результаты и их обсуждение

Процесс ферментативной и химической обработки целлюлозы приводит к закономерному уменьшению ее молекулярной массы. Для исходной целлюлозы средняя степень полимеризации была равна 1300. После ферментативного и химического расщепления этот показатель уменьшался более чем в пять раз, до уровня 550. Молекулярная масса целлюлозы является показательным, но не единственным параметром.

Оценка дисперсности материала показывает, если частицы исходной целлюлозы видны в оптический микроскоп, это означает, что их размер превышает граничный порог в 100 нм, то после обработки ферментом основная часть имела примерно следующее распределение по данным оптической микро-

скопии (%): 0,1...1,0 мкм – 25; 1,0...2,0 мкм – 20; 2,0...10,0 мкм – 40, 10...200 мкм – 15.

Химико-ферментативная обработка целлюлозной пульпы приводила к получению дисперсии, в которой по данным светорассеивания частицы имеют средний диаметр менее 50 нм.

Проведенные нами испытания показали, что прочность бумаги, полученной по стандартной технологии из вторичной бумажной пульпы, подвергнутой деградации до наноразмерного уровня, превышала прочность аналогичной бумаги на порядок и превосходила прочность исходной писчей бумаги. Так разрушающее напряжение бумаги типа «Снегурочка» толщиной 0,09 мм составляет около 2,1 МПа. Прочность вторичной бумаги, полученной по стандартной технологии, составляла 0,14 МПа, а бумаги, изготовленной из наноцеллюлозы, полученной химико-ферментативным путем, была равна более 54 МПа.

Аналогичные данные сообщаются другими авторами. Так, в работе Henriksson M. et al указывается [6], что механические испытания образцов нанобумаги, полученных на специальной машине из целлюлозы, подвергнутой предварительному механическому молочению и ферментативному расщеплению, показали, что предел прочности этих листов на разрыв составляет 214 МПа, что выше прочности на разрыв чугуна, равной 130 МПа (у обычной бумаги предел прочности на разрыв составляет около 1 МПа). При тестировании использо-

вались полоски нанобумаги размером 40 × 5 мм и толщиной 50 мкм.

Таким образом, наши исследования, также как и данные зарубежных ученых, подтверждают принципиальную возможность получения высокопрочных сортов бумаги из наноцеллюлозы, которую, в свою очередь, достаточно легко получать путем биохимической деградации обычного растительного сырья.

### Библиографический список

1. Панкреатин. ВФС 42-1405-84, 1984.
2. Иванкин, А.Н. Гидролиз нанобиомакромолекулярных систем / А.Н. Иванкин, А.А. Красноштанова. – М.: МГУЛ, 2010. – 396 с.
3. Пат. N 96372 U1 на полезную модель. Устройство для определения размера наночастиц в жидкости. / А.Н. Иванкин, Г.Л. Олиференко. Заявл. 01.03.10. Оpubл. 27.07.2010 // Бюл. № 21.
4. Оболенская, А.В. Лабораторные работы по химии древесины и целлюлозы / А.В. Оболенская, З.П. Ельницкая, А.А. Леонович. – М.: Экология, 1991. – С. 234–264.
5. Лисицын, А.Б. Методы практической биотехнологии / А.Б. Лисицын, А.Н. Иванкин, А.Д. Неклюдов. – М.: ВНИИмясной промышленности, 2002. – 408 с.
6. Henriksson M., Berglund L.A., Isaksson P., Lindstrom T., Takashi N. Cellulose nanopaper structures of high toughness // *Biomacromolecules*. – 2008. – N 9. – P. 1579–1585.
7. Loelovich M., Figovsky O. Nano-cellulose as Promising Biocarrier// *Advanced Materials Research Vols*. 2008. – N 47–50. – P. 1286–1289.
8. Wainwright S.A., Biggs W.D., Cuney J.D., Gosline J.M. *Mechanical design in organisms*. – Princeton University Press: Princeton NY, 1982.

## ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ НАНОКОМПОЗИТА «КРЕМНИЙ–ЦЕЛЛЮЛОЗА»

В.Б. ПИКУЛЕВ, *доц. каф. физики твёрдого тела ПетрГУ, канд. физ.-мат. наук,*  
С.В. ЛОГИНОВА, *доц. каф. физики твёрдого тела ПетрГУ, канд. физ.-мат. наук*

*pikulev@petsu.ru*

Созданию новых наноструктурированных композитных материалов с управляемыми физическими свойствами в настоящее время уделяется большое внимание, при этом немаловажную роль играет экологическая безопасность синтезируемого материала [1, 2]. В этой связи становится

перспективным синтез нанокompозитов, состоящих из целлюлозной основы, в которую внедрены наноразмерные частицы, не представляющие опасности для здоровья человека и животных. Несмотря на то, что давно и успешно развивается направление синтеза полимерных макромолекул с металлически-

ми наночастицами [3] и известны работы по исследованию свойств полимер-кремниевых нанокомпозитов [4], изучению электрофизических свойств кремниевых наночастиц в матрице целлюлозы внимания в литературе практически не уделено.

Нанокристаллы кремния обладают хорошо известным свойством – люминесценцией в видимом спектральном диапазоне, что успешно объясняется эффектом квантового ограничения носителей заряда в структурах с пониженной размерностью и эффектом локализации экситонов [9, 10]. Негативное влияние атмосферы, приводящее к окислению кремниевых нанокристаллитов, ведет к деградации люминесцентного сигнала [11], что предполагает использование нанокремния в составе композитных материалов, защищающих нанокристаллы от агрессивных факторов внешней среды. Возможно, перспективы использования карбазолсодержащих полимерных матриц с диспергированными наночастицами кремния [4] приоритетны в плане увеличения эффективности электролюминесценции соответствующих композитных структур. Тем не менее, свойства нанокристаллической целлюлозы и композитов на ее основе представляются малоизученными и весьма интересными в плане развития соответствующих исследований.

В первую очередь мы убедились, что механическая смесь нативной либо микрокристаллической целлюлозы и порошка нанокристаллического кремния не обладала выраженным люминесцентным сигналом, в связи с чем возникла задача создать композицию этих веществ на наноуровне. Для этого была применена методика приготовления нанокомпозита смешиванием коллоидной фракции диспергированной целлюлозы, которую далее будем именовать нанокристаллической, и порошка нанокристаллического кремния.

Использованная нами методика получения нанокристаллической целлюлозы (НКЦ) является тестовой и основана на модификации химически чистой микрокристаллической целлюлозы (МКЦ), предварительно

измельченной в агатовой ступке, в водном растворе 38 %-й соляной и 98 %-й серной кислот (соответственно 1 : 3 : 6 дист. воды) при периодическом ультразвуковом диспергировании смеси в течение нескольких часов. Кислотность раствора уменьшалась до  $pH=3$  путем промывания суспензии дистиллированной водой. Подобная методика, предложенная в [12], позволила авторам получить кристаллические фрагменты целлюлозы, средний диаметр которых, по данным просвечивающей электронной микроскопии, лежал в интервале от 20 до 100 нм. Учитывая сложную форму частиц и постоянно идущую коагуляцию фрагментов целлюлозы в суспензии, определение среднего размера частиц и дисперсии размеров представляет собой отдельную задачу.

Методами рентгенографии и ИК-спектроскопии (по изложенной в [13] методике) нами установлено, что степень кристалличности исходной МКЦ составляет  $\sim 70\%$  при размере элементарных фибрилл  $\sim 5$  нм. Действие рассмотренного выше кислотного гидролиза приводит к небольшому ( $\sim 8\%$ ) увеличению степени кристалличности при сохранении толщин и длин элементарных упорядоченных областей. Рентгенографирование образцов показало, что модифицированный материал остается аморфно-кристаллическим и по характеру расположения максимумов имеет структуру, характерную для целлюлозы I $\beta$  с параллельным расположением молекул. После выпаривания раствора при комнатной температуре чистая НКЦ получается в виде однородной пленки, легко истираемой в порошок, легко растворимой в воде или спирте.

На спектрах ИК-поглощения для НКЦ, измеренных с помощью фурье-спектрометра ФТ-801 и представленных на рис. 1, виден достаточно сильный рост поглощения в области до  $800\text{ см}^{-1}$ , связанный, вероятно, с возрастанием количества гидроксильных групп, как результат гидролиза целлюлозы. Пики  $1732\text{ см}^{-1}$  и  $851\text{ см}^{-1}$  возможно отнести к поглощению низкомолекулярных продуктов деструкции МКЦ. Рост полосы поглощения  $1315\text{ см}^{-1}$  (деформационные

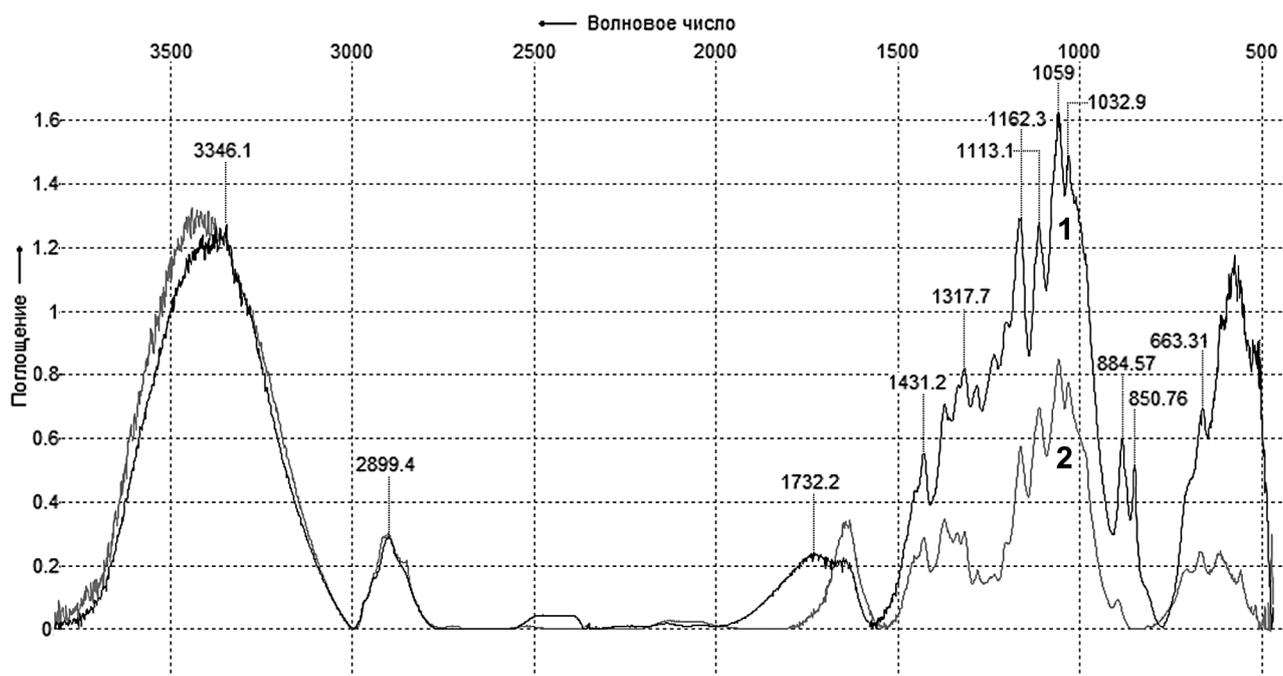


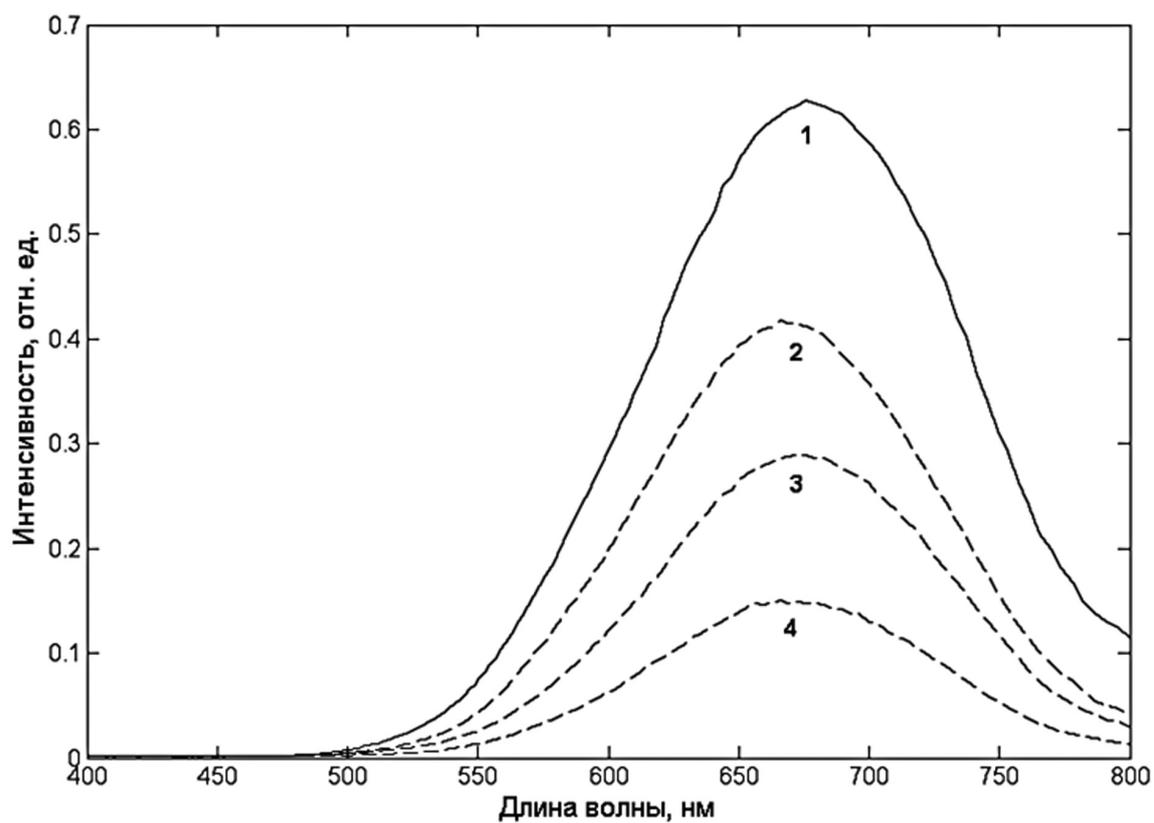
Рис. 1. ИК – спектры НКЦ (кривая 1) и МКЦ (кривая 2). Спектры откорректированы по базовой линии и нормированы на максимум полосы при 2900 см<sup>-1</sup>. Измерения проводились на воздухе в геометрии на пропускание

СН<sub>2</sub> веерные колебания) свидетельствует об уменьшении аморфной фазы вещества. Возможно, использованная обработка приводит к разрыву в первую очередь тех участков в макромолекуле целлюлозы, которые связывают элементарные фибриллы, не разрушая структуру последних.

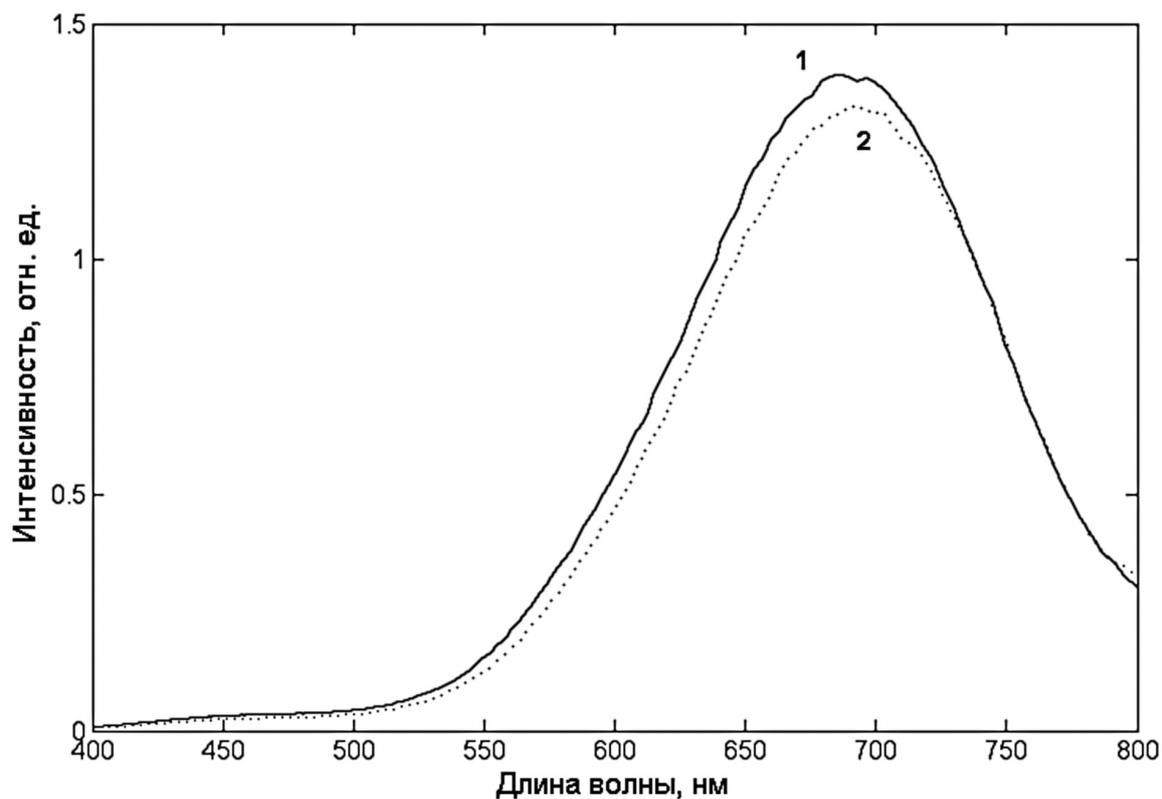
Пористый кремний (por-Si) как источник нанокристаллов был приготовлен электрохимическим травлением стандартной для микроэлектронного производства монокристаллической кремниевой пластины марки КДБ-1 в спиртовом (изопропанол) растворе 40 %-й плавиковой кислоты (1 : 1) при постоянной плотности тока 50 мА/см<sup>2</sup>. Поскольку условием существования фотолюминесценции (ФЛ) пористого кремния в видимой области спектра является наличие в его структуре наночастиц с поперечным размером от ~ 3 до ~ 40 нм, представленные на рис. 2а спектры ФЛ por-Si свидетельствуют о наличии кремниевых кластеров соответствующих размеров в приготовленных образцах. Проведенный электронно-микроскопический анализ позволяет утверждать, что в полученных образцах формируется пространственная сетка пор, при механическом

разрушении которой могут получаться как наночастицы, так и различные микро- и макроскопические фрагменты. На рис. 2а продемонстрировано влияние озоновой атмосферы на люминесцентные свойства исходного образца por-Si: необратимая деградация связана с процессами окисления, идущими на поверхности кремниевых наночастиц, что ведет к уменьшению доли кремниевых нанокристаллов, способных люминесцировать. Факт увеличения доли окисной фазы в por-Si при озоновом воздействии уверенно фиксируется ИК-спектроскопией.

Порошок нанокристаллического кремния вводился в суспензию целлюлозы в водно-спиртовом (изопропанол) растворе путем механического разрушения помещенного в раствор слоя пористого кремния с последующим ультразвуковым диспергированием. Седиментация суспензии использовалась для отделения легкой фракции, которая в дальнейшем использовалась для исследований. Образцы нанокompозита формировались прессованием (под давлением 0,26 МПа) материала, полученного в результате выпаривания растворителя при комнатной температуре. В результате полученные образцы представ-



а)



б)

Рис. 2. Влияние обработки в озоне на спектры ФЛ. а) roq-Si: 1 – исходное состояние образца, 2 – после 15 мин. воздействия, 3 – после 45 мин., 4 – после 75 мин. б) нанокompозит: 1 – исходное состояние образца, 2 – после 75 мин. воздействия

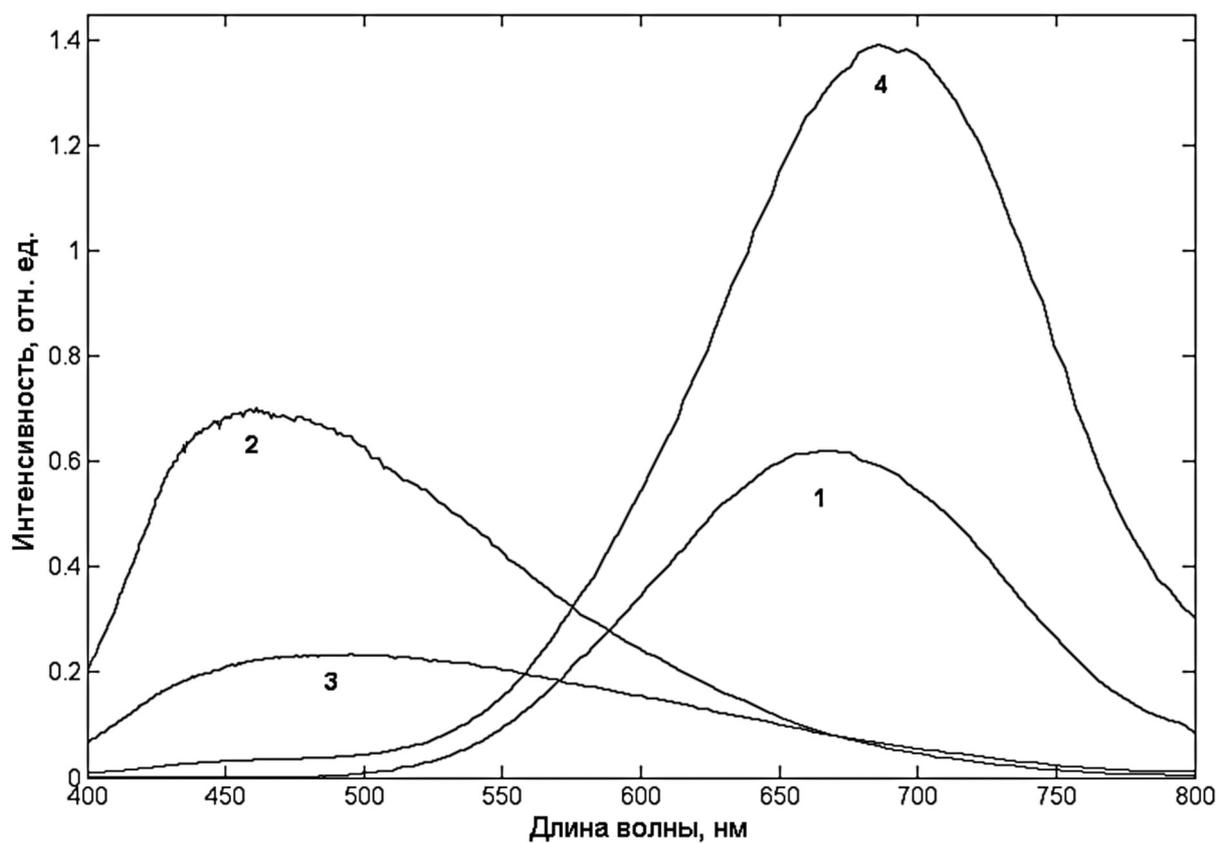


Рис. 3. Спектры ФЛ: 1 – por-Si; 2 – МКЦ; 3 – НКЦ; 4 – нанокompозит

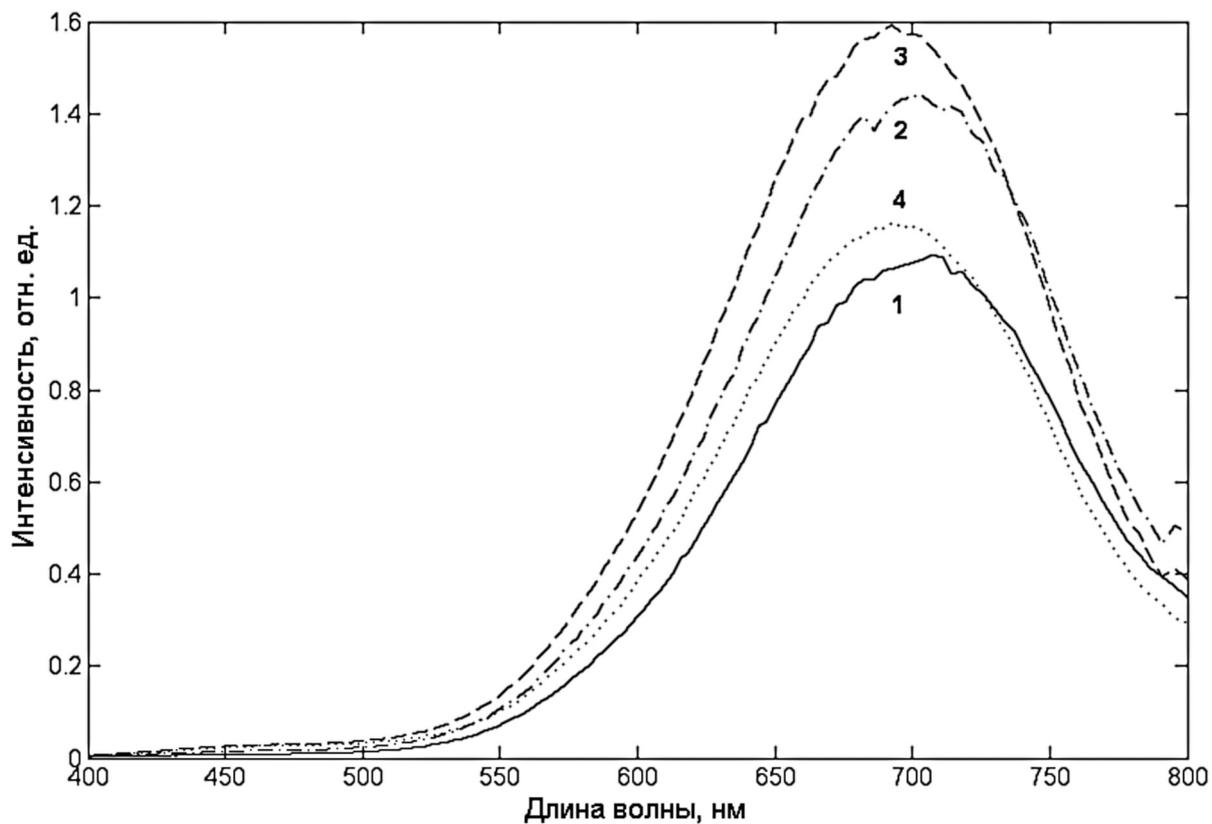


Рис. 4. Влияние обработки в низкотемпературной плазме на люминесцентные свойства нанокompозита. Кривая 1 – исходное состояние образца, 2 – после 3 мин. воздействия, 3 – после 6 мин. воздействия, 4 – после 12 мин. воздействия

ляли собой механически прочные таблетки светло-серого цвета толщиной  $\sim 0,2$  мм.

Наличие интенсивной ФЛ композита в красной области спектра (рис. 3, кривая 4) показывает, что в результате синтеза композита кремниевые наночастицы сохранились в полученном веществе и не изменили своих люминесцентных свойств. Для возбуждения ФЛ нами использовался 15 мВт непрерывный He-Cd лазер с длиной волны 325 нм. При возбуждении люминесценции УФ светодиодом ( $\lambda \sim 390$  нм), находящимся в непосредственной близости от образца, интенсивность люминесценции была достаточной для восприятия свечения глазом.

Спектр 2 на рис. 3 свидетельствует, что исходная МКЦ в случае возбуждения He-Cd лазером, имеет достаточно сильную ФЛ, существование которой можно объяснить возбуждением в целлюлозе продуктов ее деструкции, а именно, присутствием карбонильных и карбоксильных групп [5, 6], образовавшихся в результате частичного окисления целлюлозы. Спектр полученной нами НКЦ (кривая 3) отличается от спектра МКЦ более широким (разделяемым на два гауссовых пика в шкале энергий) и менее интенсивным спектром ФЛ. Сложный вид полос, характерных для спектра НКЦ, говорит о наличии более чем одного механизма высвечивания в данном материале.

Для нанокompозитного материала (кривая 4) интенсивность ФЛ в красной области вырастает по сравнению с исходным roq-Si (при условии, что один образец roq-Si идет на приготовление не менее четырех образцов композита), а коротковолновое свечение существенно уменьшается. Это, как мы полагаем, свидетельствует о протекании процессов безызлучательного переноса энергии от люминесцентных центров, характерных для НКЦ, к кремниевым нанокристаллитам. Люминесценция нанокompозита для человеческого глаза представляется пурпурной, поскольку к красному свечению нанокремния примешивается слабая фиолетовая добавка свечения НКЦ.

Деградиционная устойчивость люминесценции нанокompозита, в сравнении с

исходным roq-Si, была исследована при обработке потоком озона с использованием генератора «Озон-5П» с массовой концентрацией  $O_3$  не менее  $100 \text{ мг/м}^3$ , а также при воздействии факела низкотемпературной плазмы микроплазмотрона [7].

В случае пористого кремния (рис. 2 а) первое из указанных воздействий ведет к необратимой деградации люминесцентного сигнала, причины которого были рассмотрены выше [14]. В случае нанокompозита эффект при выбранном времени озонирования практически отсутствует (рис. 2 б), что является хорошим аргументом в пользу исследуемого материала. Влияния деструкции целлюлозы под действием озона на люминесцентные характеристики нанокompозита не выявлено.

Результаты влияния обработки в низкотемпературной плазме на ФЛ нанокompозита показаны на рис. 4. В плазменном факеле, помимо ультрафиолетового излучения, детектируются озон, молекулярный синглетный кислород, ионы кислорода, оксиды азота, но также присутствует вода, OH и  $OH^+$  группы. То есть низкотемпературная плазма выступает в качестве генератора различных ионнообменных реакций в приповерхностном слое материала.

Воздействие плазмы на ФЛ исходного roq-Si приводит к небольшому возрастанию люминесценции, последующее выдерживание в нормальных условиях в течение нескольких часов ведет к необратимой деградации свечения. Это можно объяснить эффектом нивелирования поверхностной пассивации кремниевых нанокластеров в плазменном факеле. Изначально смешанная кислородно-водородная пассивация представляет собой достаточно хороший канал поверхностной безызлучательной рекомбинации [15], ее восстановление до водородной приводит к возрастанию люминесценции, последующее окисление (которое может идти уже после плазменного воздействия) идет на большей площади и сильнее воздействует на кристаллиты.

При исследовании люминесценции нанокompозита в процессе плазменного воздействия эффект усиления люминесцентной активности проявляется в большей степени,

нежели в  $\text{por-Si}$ . Последующая деградация также имеет место, однако она незначительна и в целом интенсивность свечения после плазменной обработки и последующей релаксации остается выше исходной. Можно предположить, что протоны, проникающие в материал из газовой фазы, как и в предыдущем случае, изменяют пассивацию поверхности кремниевых нанокристаллов, однако после окончания воздействия молекулы целлюлозы блокируют выход протонов из материала.

Электрические свойства полученного композита характеризует слабая ионная проводимость, связанная с наличием в материале кислотных остатков (в т.ч. ионов водорода) и полярных продуктов деструкции молекул целлюлозы. Нами обнаружен эффект накопления и длительного удержания объемного заряда в нанокompозитах. Типичная разность потенциалов после зарядки при 200 В составляет 0,65 В и увеличивается с ростом температуры. Нанокompозит обладает свойством многократной перезарядки со сменой полярности без выраженных деградационных эффектов. Несмотря на то, что ионная проводимость наблюдается и в НКЦ, эффект накопления заряда при наличии кремниевых нанокристаллов в композите выражен сильнее.

Таким образом, можно считать полученное вещество новым и перспективным электретом. Полагая, что растворимость в воде нельзя однозначно считать полезным свойством представленного материала, нами также показано, что при последующем высушивании люминесцентные и электретные свойства материала сохраняются. Следовательно, можно предполагать перспективное использование полученного нанокompозита как минимум в качестве экологически чистого люминесцентного наполнителя, устойчивого к газофазному окислению.

Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» № 14.740.11.0018.

### Библиографический список

1. Гелес, И. Древесная биомасса и основы экологически приемлемых технологий ее химико-механической переработки / И. Гелес. – Петрозаводск, 2001. – 382 с.
2. Третьяков, Ю. Функциональные наноматериалы / А. Елисеев, А. Лукашин. Под ред. Ю. Д. Третьякова. – М.: Физматлит, 2010. – 456 с.
3. Помогайло, А. Металлополимерные нанокompозиты с контролируемой молекулярной архитектурой / А. Помогайло // Рос. хим. ж. – 2002. – Т. XLVI, N 5. – С. 64–73.
4. Алешин, А. Электрические и оптические свойства композитов на основе производных карбазола и частиц кремния / А. Алешин, Е. Александрова, И. Щербаков // Физика твердого тела. – 2008. – т. 50, N 5. – С. 931–935.
5. Байклз, Н. Целлюлоза и ее производные / Н. Байклз, Л. Сегал. т. 1, 2. – М.: Мир, 1974. – 1010 с.
6. Красовицкий, Б. Органические люминофоры / Б. Красовицкий, Б. Болотин. – М.: Химия, 1984. – 336 с.
7. Гостев, В. Спектр излучения гелиевого микроплазмотрона / В. Гостев, К. Екимов, Л. Луизова, А. Хахаев // Материалы IV Российского семинара «Современные средства диагностики плазмы и их применение для контроля веществ и окружающей среды». – Москва, МИФИ, 2003. – С. 66–68.
8. Kumar, V. Nanosilicon / Edited by V. Kumar. – Elsevier, 2007. – 368 p.
9. Cullis, A. The structural and luminescence properties of porous silicon / A. Cullis, L. Canham, and P. Calcott // Appl. Phys. Rev. – 1997. – Vol. 82, N 3. – P. 909–965.
10. Takagahara, T. Theory of the quantum confinement effect on excitons in quantum dots of indirect-gap materials / T. Takagahara and K. Takeda // Phys. Rev. B. – 1992. – Vol. 46, N 23. – P. 15578–15581.
11. Kuznetsov, S. Nonradiative processes and luminescence spectra in porous silicon / S. Kuznetsov, V. Pikulev, Yu. Gardin, I. Klimov, V. Gurtov // Phys. Rev. B. – 1995. – Vol. 51, N 3. – P. 1601–1604.
12. Wang, N. Preparation and Liquid Crystalline Properties of Spherical Cellulose / N. Wang, E. Ding, R. Cheng // Langmuir. – 2008. – Vol. 24. – P. 5–8.
13. Nelson, M. Relation of Certain Infrared bands to cellulose crystallinity and crystal lattice type. Part I. Spectra of lattice types I, II, III, and of amorphous cellulose / M. Nelson, R. O'Connor // Journal of applied polymer science. – 1964. – Vol. 8. – P. 1311–1324.
14. Pikulev, V. Peculiarities of ozone adsorption on a porous silicon surface at low temperature / V. Pikulev, A. Tsyganenko, S. Kuznetsov, A. Saren, and V. Gurtov // Physica Status Solidi (c). – 2007. – Vol. 4, N 6. – P. 2116–2120.
15. Sailor, M. Surface chemistry of luminescent silicon nanocrystallites / M. Sailor, E. Lee // Advanced Materials. – 1997. – Vol. 9, No. 10. – P. 783–793.

## МОДИФИКАЦИЯ КАРБАМИДОФОРМАЛЬДЕГИДНЫХ ОЛИГОМЕРОВ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ

А.Н. ОБЛИВИН, *проф. каф. процессов и аппаратов д/о производств, д-р техн. наук,*

А.Ю. СЕМОЧКИН, *асп. каф. технологии древесных плит и пластиков,*

Ю.А. СЕМОЧКИН, *доц. каф. технологии древесных плит и пластиков, канд. техн. наук*

М.В. ЛОПАТНИКОВ, *доц. каф. процессов и аппаратов д/о производств, канд. техн. наук*

*lopaticnikov@mgul.ac.ru*

Начиная с момента промышленного применения карбамидных клеев ведется работа по их модификации. Труды ряда исследователей установлено, что раствор карбамидоформальдегидного олигомера есть коллоидно-дисперсная система, слагаемая из трехмерно упакованных глобул, поэтому можно ожидать, что глобулярная структура будет сохраняться и в отвержденном клее. И тогда следует, что процесс отверждения олигомера есть рост глобулы или ее уплотнение химическими связями внутри с последующим формированием межглобулярных связей. Вполне вероятно, что химические связи формируются в самой глобуле, а межглобулярные взаимодействия обусловлены различного рода физическими связями.

С этой точки зрения можно сделать вывод о весьма высокой важности процессов физического межглобулярного взаимодействия. В этом смысле выглядит весьма перспективным применение в качестве модификатора продолговатых армирующих структурных элементов нанометровых размеров, нанотрубок с высоким отношением длины к толщине.

Кафедрой технологии древесных плит и пластиков совместно с кафедрой процессов и аппаратов деревообрабатывающих производств проведена поисковая научно-исследовательская работа по модификации карбамидоформальдегидных олигомеров углеродными нанотрубками. Для проведения эксперимента были использованы многослойные нанотрубки, синтезированные в лаборатории Российского нового университета «РосНоу», с которым Московский государственный университет леса имеет тесные научные связи в области наноматериалов и нанотехнологий. Углеродные нанотрубки были

получены методом электродугового синтеза в среде инертного газа, без кислотной очистки. Размеры: внешний диаметр 60–80 нм, внутренний диаметр 10 нм, длина 5–7 мкм.

В экспериментах использовали малотоксичную карбамидоформальдегидную смолу КФМТ-15 изготовленную на основе карбамидоформальдегидного концентрата КФК-85 при мольном соотношении  $K : \Phi = 1 : 1,15$  на Жилевском заводе пластмасс и смолу КФО с мольным соотношением  $K : \Phi = 1 : 1,3$ . Расход наномодификатора 1 % от массы товарной смолы.

В экспериментах использовались два различных метода диспергирования нанотрубок: механический, при помощи лабораторной дезинтеграторной установки ДУ-16, и при помощи ультразвукового диспергатора марки ИЛ100-6/2.

Лабораторная ультразвуковая установка ИЛ100-6/2 имеет ступенчатую регулировку, кратную 50 %, 75 %, 100 % номинальной выходной мощности. Регулировка мощности и наличие в комплекте трех различных волноводов-излучателей (с коэффициентом усиления 1 : 0,5, 1 : 1 и 1 : 2) позволяет получить различную амплитуду ультразвуковых колебаний в исследуемых жидкостях и упругих средах, ориентировочно, от 0 до 80 мкм на частоте 22 кГц.

Смолу и модификатор предварительно перемешивали в стакане при помощи лабораторной мешалки в течение 30 мин. Затем производилась обработка на дезинтеграторе или ультразвуком в течение 10 мин. Аналогично обрабатывали смолу без модификатора.

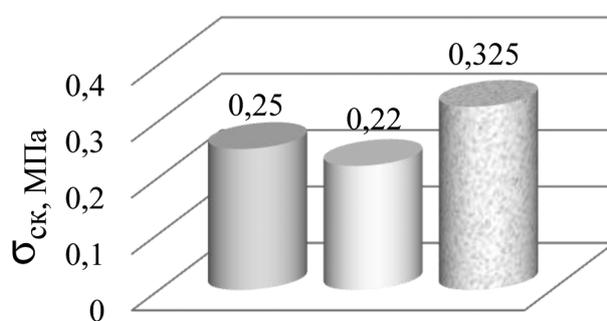
На основе модифицированных смол были изготовлены древесно-стружечные плиты. Адгезионные и когезионные свойства связующих оценивали методом скалывания по ГОСТ 9624-93.

**Свойства смол после обработки в дезинтеграторе**

Образец смолы	Время желатинизации, с	Условная вязкость по ВЗ-4, с
Исходная	70	49,4
После обработки в дезинтеграторе	63	53,3
После обработки в дезинтеграторе, с наночастицами	55	59,6

**Свойства плит, полученных с использованием наномодифицированной карбамидной смолы КФ МТ-15**

Образец смолы	Наименование показателя				
	Предел прочности при растяжении, МПа	Предел прочности при изгибе, МПа	Разбухание за 24 ч, %	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Содержание формальдегида, %
Исходная смола	0,25	18,1	45	738	12,3
Модифицированная наночастицами	0,32	17,8	44	742	12,4



- Исходная смола, пропущенная через дезинтегратор
- Смола, пропущенная через дезинтегратор с добавлением ПАВ Melpan A
- Смола, модифицированная наночастицами с добавлением ПАВ Melpan A

Рис. 1. Предел прочности при скалывании клеевого слоя образцов фанеры, изготовленных с применением карбамидной смолы КФМТ-15

В наибольшей степени прочностные свойства клеевых соединений проявляются при торцовом склеивании древесины. Образцы были изготовлены из древесины дуба. Форма и размеры соответствуют рекомендациям ВНИИДРЕВ по ОСТ 13-101-80 «Метод определения клеящей способности связующего».

В результате обработки смолы КФМТ-15 в дезинтеграторе вследствие явлений диссипации происходит интенсивный нагрев смолы и начало конденсационных процессов. В связи с этим продолжительность диспергирования модификатора была ограничена до 10 мин. Подобное поведение смолы сопровождается нарастанием вязкости и снижением времени желатинизации смолы без модификатора. При введении модификатора эти

процессы проявляются в большей степени (табл. 1).

По результатам испытаний, представленным в табл. 2, установлено повышение предела прочности при растяжении перпендикулярно пласти приблизительно на 30 %, водостойкость и токсичность плит осталась на прежнем уровне, что говорит об отсутствии химического взаимодействия смолы и модификатора.

Также с использованием смолы КФМТ-15, модифицированной наночастицами, были изготовлены образцы фанеры. Результаты испытаний представлены на рис. 1.

По результатам испытаний установлено увеличение на 30 % предела прочности

**Свойства смол после обработки ультразвуком**

Образец смолы	Массовая доля сухого остатка, %	Концентрация ионов водорода, рН	Время желатинизации, с	Условная вязкость по ВЗ-4, с
Исходная	66	7,5	59	143
После ультразвуковой обработки	68	7,4	55	175
После ультразвуковой обработки с наночастицами	69	7,5	51	190

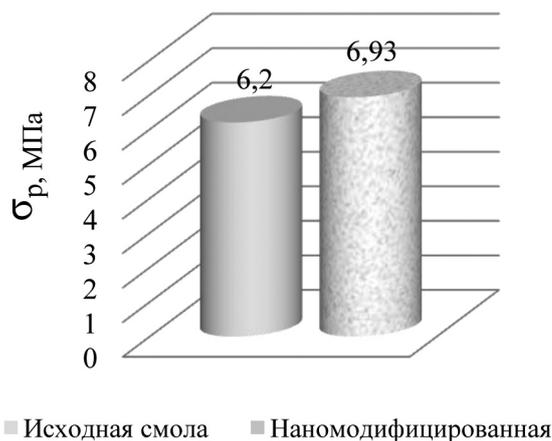
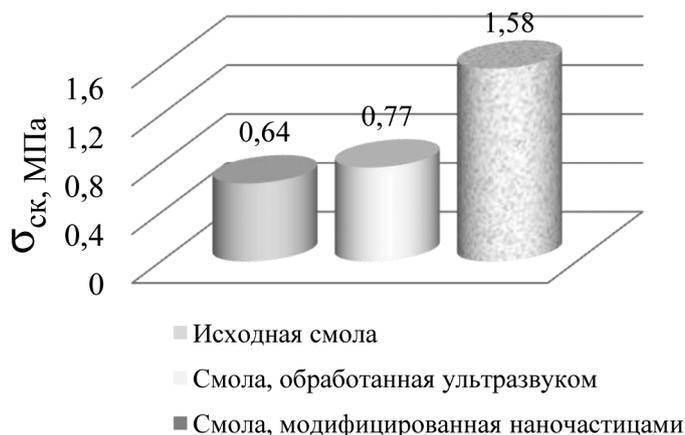


Рис. 2. Предел прочности при скалывании клеевого слоя образцов фанеры, изготовленных с применением карбамидной смолы КФО

Рис. 3. Предел прочности при растяжении торцовых соединений, склеенных впритык с применением карбамидной смолы КФО

при скалывании по клеевому слою фанеры для модифицированной смолы.

Карбамидоформальдегидная смола общего применения КФО изготавливается при мольном соотношении карбамида и формальдегида К : Ф = 1 : 1,3. Соответственно она обладает более высокой реакционной способностью, водостойкостью и прочностью в отвержденном состоянии. В табл. 3 показано, как меняются свойства смолы КФО после обработки ультразвуком.

Для исследования эффективности модификации этой смолы и оценки ее адгезионных и когезионных свойств были проведены испытания на скалывание по клеевому слою фанеры и по показателю предела прочности при растяжении торцового клеевого соединения впритык. В этом случае качество связующего проявляется в наибольшей степени. Результаты, полученные в ходе экспериментальных исследований, приведены на рис. 2.

Среди смол, подвергнутых обработке ультразвуком, максимальную прочность по-

казал образец, модифицированный наночастицами. Прочность возросла в 2 раза по сравнению с исходной смолой.

Формирование структуры полимера при горячем и холодном отверждении карбамидоформальдегидного олигомера происходит по различным механизмам. Торцовые клеевые соединения были получены методом холодного склеивания, модификацию смол производили путем ультразвукового диспергирования.

Результаты испытаний образцов торцовых клеевых соединений представлены на рис. 3.

Полученные результаты позволили сделать следующие выводы:

– при использовании УНТ для модификации карбамидных смол с различными мольными соотношениями наблюдается увеличение прочности клеевого соединения при испытаниях на скалывание и растяжение, наблюдается некоторое повышение скорости отверждения смолы;

– водостойкость и токсичность образцов плит остается на прежнем уровне, что свидетельствует об отсутствии химического взаимодействия модификатора и олигомера;

– использование углеродных частиц нанометрового размера для модификации карбамидоформальдегидных олигомеров, а также способ подготовки и диспергирования модификатора требует дополнительного изучения с целью выбора оптимальных режимов модификации;

– применение двух использованных методов диспергирования модификатора –

ультразвуковая и дезинтеграторная обработка смол также оказывает существенное влияние на их свойства, что необходимо учитывать при проведении исследований.

### Библиографический список

1. Тележкин, В.В. Склеивание древесных материалов карбамидными олигомерами, модифицированными механическим способом: дис. ... канд. техн. наук : 05.21.05/ В.В. Тележкин. – М.: МГУЛ, 1987. – 240 с.
2. Старостин, В.В. Материалы и методы нанотехнологии : учебное пособие под общ. ред. Л. Н. Патрикеева./ В.В. Старостин. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. – 431 с.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ НАНОСТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ДРЕВЕСИНЫ НА ЕЕ ДЕФОРМАТИВНОСТЬ

Б.Н. УГОЛЕВ, *проф. каф. древесиноведения МГУЛ, д-р техн. наук, акад, РАЕН и ИАВС,*

В.П. ГАЛКИН, *проф. каф. древесиноведения МГУЛ, д-р техн. наук,*

Г.А. ГОРБАЧЕВА, *доц. каф. древесиноведения МГУЛ, канд. техн. наук,*

А.А. КАЛИНИНА, *асп. каф. древесиноведения МГУЛ,*

С.Ю. БЕЛКОВСКИЙ, *студент МГУЛ*

*ugolev@mgul.ac.ru, vgalkin@mgul.ac.ru*

Древесина может быть отнесена (Уголев, 2011) к природным «умным» материалам, которые функционально, полезно реагируют на изменение параметров окружающей среды. Доминантный признак умных материалов – эффект памяти формы. Он связан с деформативностью материала. В древесине при стабильной температуре и влажности под нагрузкой во времени развиваются обратимые упругие  $\varepsilon_e$  и эластические  $\varepsilon_v$  деформации и необратимое течение  $\varepsilon_c$ . После разгрузки остаются пластические деформации  $\varepsilon_p = \varepsilon_c$ . Эффект памяти древесины основан на образовании *замороженных деформаций*.

Замороженные упруго-эластические деформации – следствие временной перестройки наноструктуры нагруженной древесины при увеличении ее жесткости в процессах сушки или охлаждения.

Эти квазиостаточные деформации были обнаружены в МГУЛ в начале 1960-х при сушке закрепленного образца древесины. История и основные результаты исследо-

ваний деформационных превращений древесины рассмотрены в указанной выше статье. Приведем некоторые результаты экспериментов, выполненных в последнее время.

Из разработанного в 1971 г. (Уголев, Лапшин, 1971) интегрального закона деформирования древесины вытекает, что при сушке под нагрузкой общие деформации не меняются, несмотря на увеличение жесткости древесины. Это следствие перехода части упруго-эластических деформаций в замороженные.

Визуализация этого явления и эффекта деформационной памяти древесины была выполнена на кленовых образцах лущеного шпона.

На рис. 1 показаны: исходная плоская форма полоски сырого шпона (а), кольцеобразная форма после нагружения (изгиба) сырого шпона (б), предсказанное интегральным законом деформирования сохранение общих деформаций при сушке нагруженной древесины (в), форма сухого образца шпона после разгрузки. Как видим, появился зазор

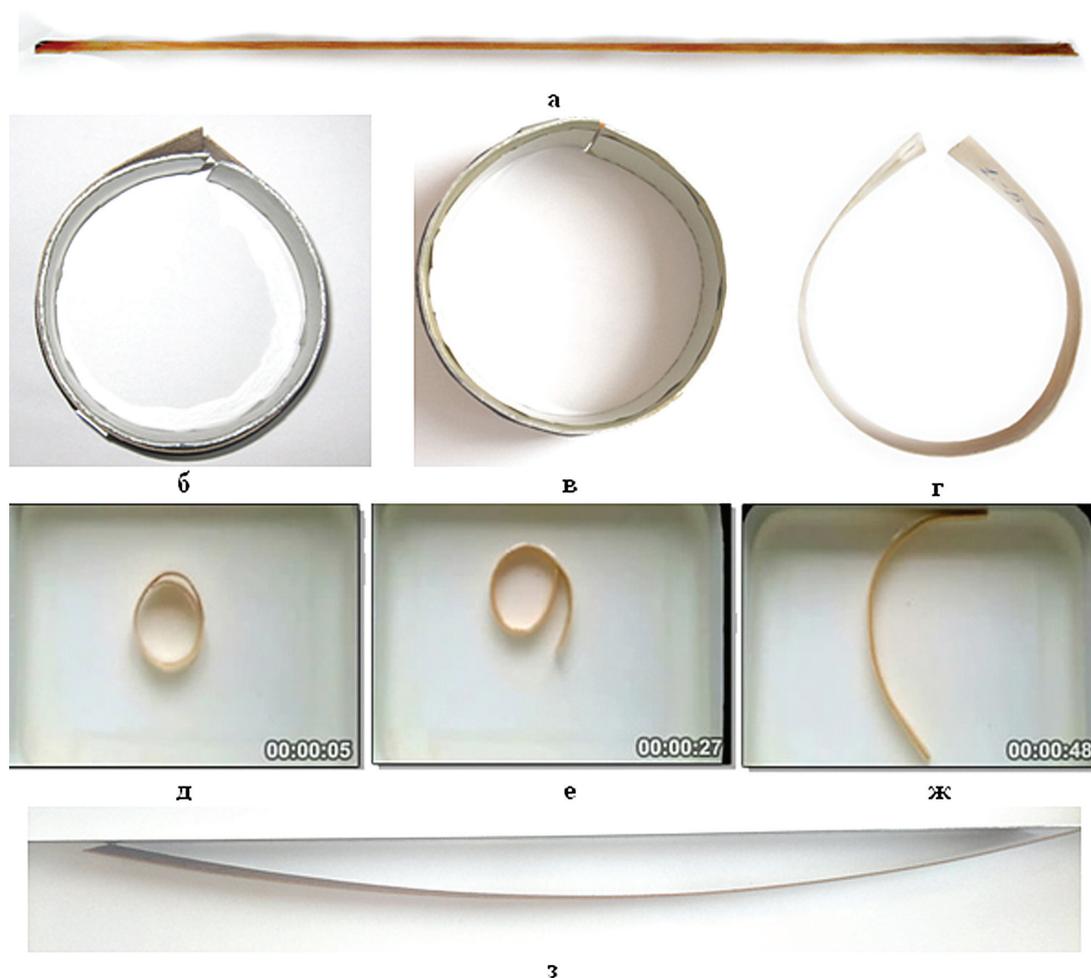


Рис. 1. Изменение формы образцов шпона и эффект памяти древесины: а – сырая древесина, б – нагруженная сырая древесина (изгиб вдоль волокон), в – после сушки под нагрузкой, г – после разгрузки сухой древесины, д – в начале увлажнения, е – через 27 сек. увлажнения, ж – через 48 сек. увлажнения, з – после увлажнения и выдержки

в результате снятия упруго-эластических деформаций. Остались сет-деформации, включающие квазиостаточные замороженные деформации и пластические деформации. Последующее увлажнение образца приводит к его распрямлению. На рис. 1 д, е, ж показаны формы образца на разных стадиях увлажнения. Они отражают не разбухание древесины (вдоль волокон оно ничтожно), а последствия «размораживания» замороженных деформаций. Происходит восстановление наноструктуры, ответственной за упруго-эластическую деформацию. После увлажнения образец почти вернулся к плоской форме (1з). Небольшая изогнутость образца свидетельствует о сохранившейся пластической деформации.

Более сложные явления происходят при стесненной усушке древесины, когда она

нагружается поперек волокон. Изменение наноструктуры древесины при совместном действии нагрузки и уменьшении влажности было исследовано совместно с Институтом физики твердого тела РАН методом ИК-спектроскопии. Исследования показали, что при сушке нагруженной древесины увеличивается степень ориентации в аморфных областях целлюлозы и возрастает концентрация водородных связей. Вымачивание в воде и последующая сушка восстанавливают исходную наноструктуру древесины.

На рис. 2 показана схема деформационного поведения древесины при сушке под постоянной растягивающей нагрузкой.

Компоненты сушильных деформаций: замороженная упруго-эластическая деформация  $\varepsilon_f = \varepsilon_{ev1} - \varepsilon_{ev2}$ , редуцированная усушка

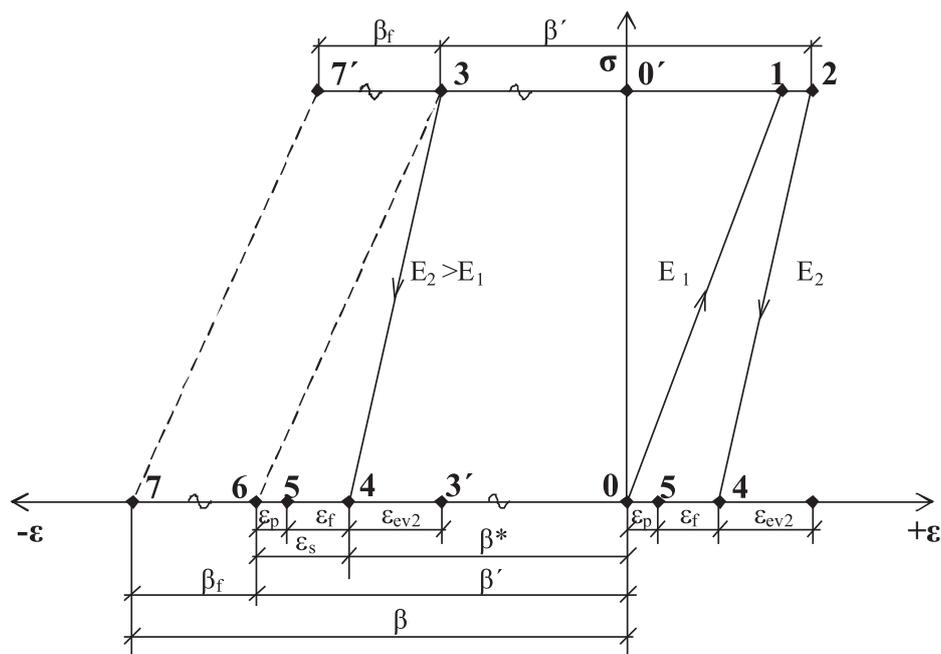


Рис. 2. Схема деформирования древесины поперек волокон под постоянной нагрузкой, при сушке и разгрузке: 0–1 – растяжение влажной древесины, 1–2–3 – сушка нагруженной древесины, 3–4 – разгрузка и выдержка сухой древесины; отрезки: 0'–1' – упруго-эластическая деформация влажной древесины  $\varepsilon_{ev1}$ , 3'–4' – упруго-эластическая деформация сухой древесины, 1–2 равный 5–6 – пластическая деформация при сушке  $\varepsilon_p$ ; 2–3 равный 0–6 – «редуцированная усушка»  $\beta'$ ; 0–4 – «гипоусушка»  $\beta^*$ ; 4–5 – замороженная упруго-эластическая деформация  $\varepsilon_f$ ; 4–6 – сет-деформация  $\varepsilon_s$ ; 6–7 равный 3–7' – «замороженная усушка»  $\beta_f$ ; 0–7 – свободная усушка  $\beta$

нагруженной древесины  $\beta'$ ; гипо-усушка, т.е. реально наблюдаемое уменьшение размера образца, высушенного под нагрузкой  $\beta^*$ , замороженная усушка  $\beta_f = \beta - \beta'$  и сет-деформация  $\varepsilon_s$  были определены экспериментально на установке кафедры древесиноведения МГУЛ (Уголев, Галкин, Горбачева, Калинина, 2010). Опыты проводились на древесине ясеня (*Fraxinus excelsior* L.) при растяжении поперек волокон в тангенциальном направлении. Поперечное сечение образцов составляло 17Ч3 мм, база измерений 30 мм, температура 80 °С. Было подтверждено прогнозированное сохранение общих деформаций нагруженной древесины при сушке.

Далее было проведено исследование обратимости замороженных деформаций, остающихся после сушки нагруженной древесины, путем последовательного выполнения следующих операций. Каждый образец подвергался предварительному вымачиванию в воде, сушке, вымачиванию, затем – нагружению, сушке под постоянной нагрузкой, разгрузке и вымачиванию. На рис. 3 представлены результаты одного из опытов.

При увлажнении древесины происходят два противоположно направленных процесса: размораживание замороженных деформаций и разбухание образца. Отрезок 6–7 отражает результат частичного размораживания и разбухания образца. Дальнейшее разбухание выявляет пластическую деформацию растяжения  $\varepsilon_p = 0,007$ , отраженную отрезком 9–10, равным отрезку 8–13. Участок 12–13 соответствует редуцированной усушке  $\beta' = 0,076$  Отрезок 11–13 отражает замороженную усушку  $\beta_f = 0,106 - 0,076 = 0,030$ .

Заключая, отметим, что перестройка наноструктуры древесины под действием нагрузки и одновременно изменяющейся влажности или температуры приводит к образованию замороженной упруго-эластической деформации и замороженной усушки. Эти квазиостаточные деформации исчезают при увлажнении древесины. Замороженные деформации лежат в основе эффекта памяти формы у древесины как природного умного материала. При расчете сушильных напряжений необходимо учитывать не только образование заморожен-

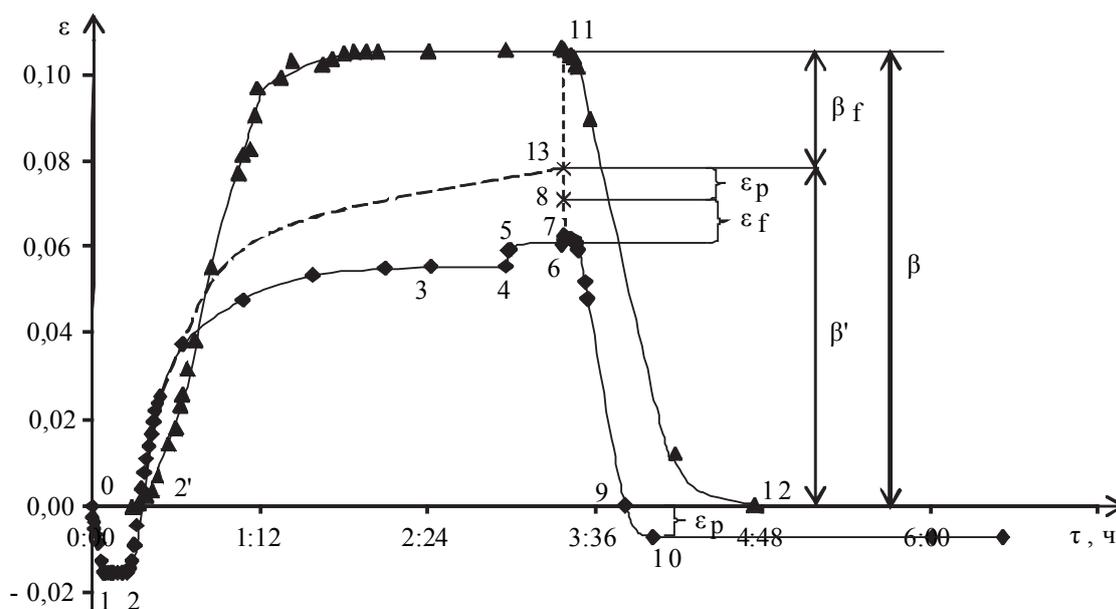


Рис. 3 Изменение деформации во время опыта – ясень, растяжение, танг.  $t = 80^\circ\text{C}$ ,  $W_{\text{нач.}} = 86\%$ ,  $W_{\text{кон.}} = 2\%$ ,  $P = 50$  Н: кривая 0–1–2 – упруго-эластическая деформация влажной древесины  $\epsilon_{\text{ev1}} = 0,015$ ; кривая 2–3–4 отражает сушку под нагрузкой; на участке 4–5–6 показано возвращение упруго-эластической деформации сухой древесины  $\epsilon_{\text{ev2}} = 0,006$  после разгрузки и некоторой выдержки; на графике точкой 11 отмечена величина свободной усушки  $\beta = 0,106$ , отложенной от точки 2'. Величину невозвращенной деформации отражает отрезок 6–11. Она включает замороженную деформацию  $\epsilon_f = 0,015 - 0,006 = 0,009$ , соответствующую отрезку 6–8; затем образец вымачивают; величина свободного разбухания, равного свободной усушке, отмечена точкой 12

ной деформации, но и возникновение замороженной усушки.

Дальнейшее изучение деформационных превращений древесины открывает новые возможности создания эффективных нанокompозитных древесных материалов.

#### Библиографический список

1. Уголев, Б.Н. Наноструктурные изменения древесины как природного «умного» материала. – Нано-

технологии и наноматериалы в лесном комплексе: монография / Б.Н. Уголев. – М: МГУЛ, 2011. – С. 52–73.

2. Уголев, Б.Н. О деформировании древесины при нагружении в условиях сушки / Б.Н. Уголев, Ю.Г. Лапшин // Лесной журнал. – № 3. – 1971. – С. 63–65.

3. Уголев, Б.Н. Эффект «замораживания» деформаций при сушке древесины / Б.Н. Уголев, В.П. Галкин, Г.А. Горбачева, А.А. Калинина // сб. науч. тр. – Вып. 349. – М.: МГУЛ, 2010. – С. 6–14.

## НАНОМОДИФИЦИРОВАННЫЕ КЛЕЕВЫЕ СОСТАВЫ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ПЛИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ДРЕВЕСНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ И КОСТРЫ ЛЬНА

С.А. УГРЮМОВ, проф. каф. механической технологии древесины КГТУ, д-р техн. наук,  
В.Е. ЦВЕТКОВ, проф. каф. технологии производства древесных плит и пластиков МГУЛ,  
д-р техн. наук

[ugr-s@yandex.ru](mailto:ugr-s@yandex.ru), [tsvetkov@mgul.ac.ru](mailto:tsvetkov@mgul.ac.ru)

Одним из направлений эффективной переработки костры является производство плитных конструкционных материалов, например костроплит, изготавливаемых по технологии древесно-стружечных плит. Костра

льна является дешевым и доступным сырьем. Однако при осмолении костры традиционными синтетическими смолами (карбамидоформальдегидными, фенолформальдегидными) сложно достичь равномерного их распреде-

ления по всем частицам. Неравномерность осмоления костры приводит к нестабильности свойств по толщине и формату плиты, что негативно отражается на эксплуатационных характеристиках продукции.

Улучшение качественных показателей клееных материалов, произведенных с применением костры, возможно путем применения соответствующих клеевых композиций, обеспечивающих полное и равномерное смачивание частиц наполнителя. Практический вопрос подбора типа и рецептур клеевых составов для производства плитных материалов на основе костры, или на основе костры в смеси с древесными частицами может быть решен на основе привлечения результатов фундаментальных наук в области адгезии, поверхностных явлений и смачивания.

Адгезия – сложный комплекс физико-химических явлений, в основе которых лежит молекулярное взаимодействие приведенных в контакт разнородных материалов. Это взаимодействие вызывает уменьшение свободной энергии системы. Опираясь такими термодинамическими понятиями, как свободная поверхностная энергия ( $\gamma$ ) и поверхностное натяжение ( $\sigma$ ), можно описать некоторые этапы адгезионного взаимодействия, например, смачивания адгезивом поверхности субстрата [1, 2]. Смачивание – это также проявление молекулярных сил, проявление сродства адгезива к субстрату. Изучение смачивания различных субстратов представляет интерес в том отношении, что позволяет выявить сродство адгезива к субстрату, сравнивать молекулярные силы, действующие в различных системах адгезив–субстрат и, кроме этого, определить рациональные клеевые составы, при использовании которых прогнозируются максимальные эксплуатационные характеристики произведенных клееных материалов.

Полимерные составы, применяемые при осмолении наполнителей, должны обеспечивать полное смачивание поверхности субстрата, а также межфазный контакт между адгезивом и субстратом и межфазное или адсорбционное взаимодействие на границе двух фаз, то есть на границе полимер–наполнитель. Физико-химические аспекты этих

явлений обстоятельно изложены в работах [3–5].

Явление смачивания связано с соотношением поверхностных энергий адгезива и субстрата. Для достижения хорошего смачивания и хорошей адгезии необходимо, чтобы поверхностная энергия и поверхностное натяжение субстрата было больше поверхностной энергии и поверхностного натяжения адгезива

$$\begin{aligned} \gamma_{\text{субстрат}} &> \gamma_{\text{адгезив}} \\ \sigma_{\text{субстрат}} &> \sigma_{\text{адгезив}} \end{aligned}$$

Поверхностное натяжение карбамидоформальдегидной смолы марки КФН-66 составляет 63,4 МДж/м<sup>2</sup>, фенолформальдегидной смолы СФЖ-3013 – 73,2 МДж/м<sup>2</sup>, при этом поверхностное натяжение древесных субстратов гораздо ниже, а именно, у березы – 49 МДж/м<sup>2</sup>, у сосны – 47 МДж/м<sup>2</sup>, у костры льна – 45 МДж/м<sup>2</sup> [6], то есть условие полного смачивания с термодинамической точки зрения не выполняется.

При производстве плитных материалов на основе древесных частиц даже при использовании клеев с большим значением поверхностного натяжения равномерное распределение клея по поверхности частиц возможно за счет их перетирания в процессе выполнения операции осмоления. При использовании костры льна этот процесс затруднен, так как частицы костры обладают меньшей жесткостью и в процессе осмоления при контакте друг с другом деформируются, затрудняя поверхностный контакт и перенос клея.

Для повышения смачивающей способности клеевых составов необходимо снижать величину их поверхностного натяжения до уровня осмоляемых субстратов, что возможно путем введения в состав клеев наномодификаторов, например, простых спиртов или составов, содержащих спирты. Концентрируясь на поверхности раздела фаз, как правило, слоем, толщиной в мономолекулярный слой, спирты вызывают снижение поверхностного натяжения клеевого состава. Регулируя тип и количество добавляемого спирта, или иной спиртосодержащей добавки, можно создать клеевую композицию с требуемым значени-

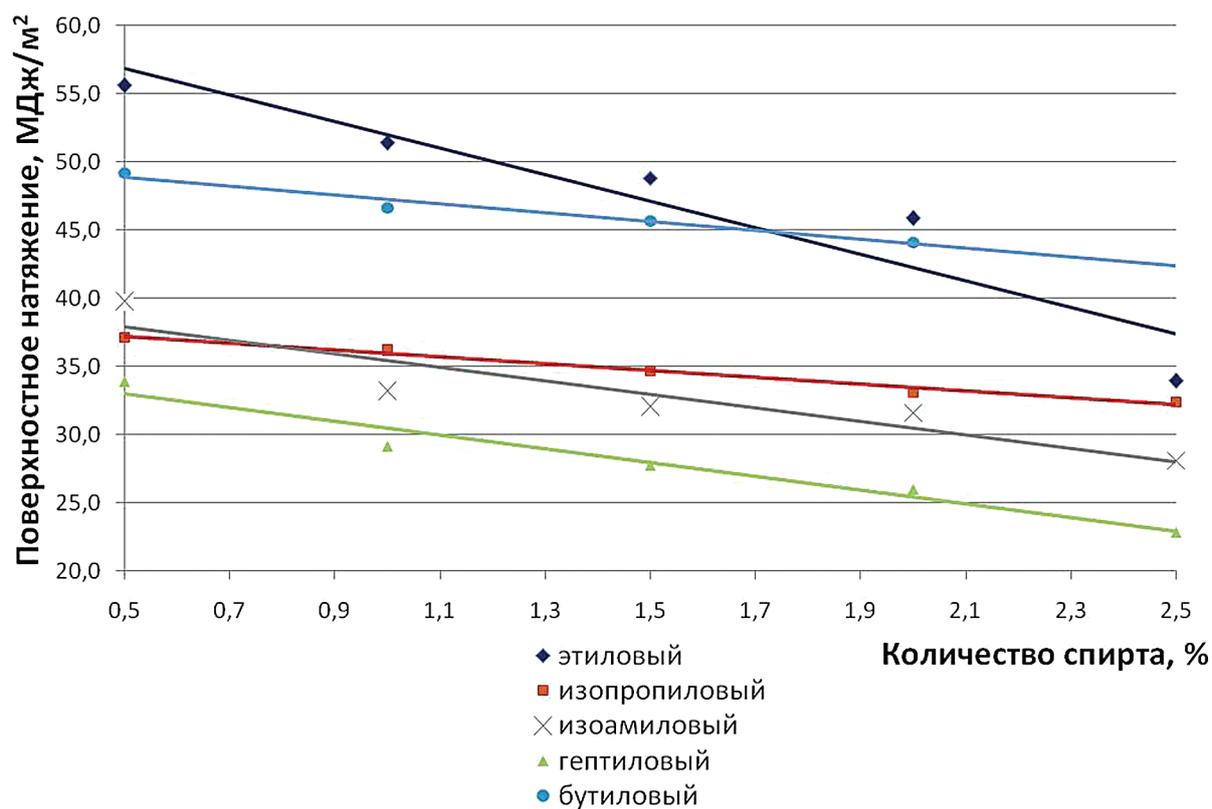


Рис. 1. Влияние типа и количества спиртов на поверхностное натяжение модифицированных клеевых составов на основе смолы КФН-66

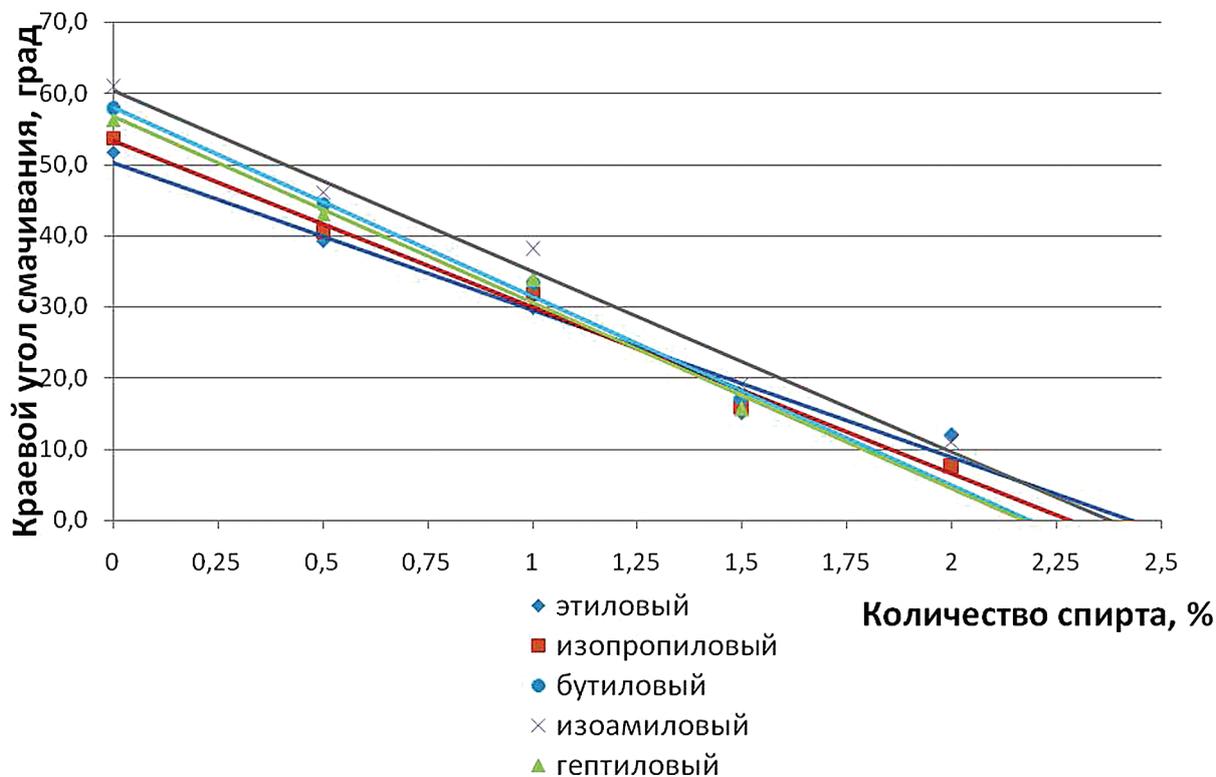


Рис. 2. Влияние типа и количества спиртов, добавляемых в смолу КФН-66, на краевой угол смачивания

ем поверхностного натяжения, необходимого для полного осмоления наполнителя.

В качестве примера на рис. 1, 2 представлено влияние типа и количества спиртов на поверхностное натяжение и краевой угол смачивания модифицированных клеевых составов на основе карбамидоформальдегидной смолы КФН-66 при контактировании с наполнителем древесных плит – кострой льна.

Путем теоретических и экспериментальных исследований разработаны клеевые композиции на основе синтетических смол, модифицированные спиртами и спиртосодержащими соединениями, обеспечивающие полное смачивание костры льна как наполнителя древесных плит.

1. Клей на основе карбамидоформальдегидной смолы и модификатора бутилового спирта (бутанола-1), который готовится при следующем соотношении компонентов, масс. ч:

- карбамидоформальдегидная смола жидкая КФН-66 (основа клея) 100;
- хлористый аммоний (отвердитель) 0,6–0,65;
- бутанол-1 (модификатор) 1–2.

2. Клей на основе фенолформальдегидной смолы и модификатора бутилового спирта (бутанола-1), который готовится при следующем соотношении компонентов, масс. ч:

- фенолформальдегидная смола СФЖ-3014 жидкая (основа клея) 100;
- бутанол-1 (модификатор) 1,5–2,5.

3. Клей на основе карбамидоформальдегидной смолы и модификатора поливинилацетатной дисперсии, который готовится при следующем соотношении компонентов, масс. ч:

- карбамидоформальдегидная смола КФН-66 (основа клея) 100;
- хлористый аммоний (отвердитель) 0,6–0,65;
- поливинилацетатная дисперсия (модификатор) 10–20.

4. Клей на основе фенолформальдегидной смолы и модификатора поливинилацетатной дисперсии, который готовится при следующем соотношении компонентов, масс. ч:

- фенолформальдегидная смола СФЖ-3014 (основа клея) 100;
- поливинилацетатная дисперсия (модификатор) 10–20.

При приготовлении данных клеев исходные компоненты смешивают в установках приготовления связующего непрерывного действия. Компоненты связующего (смола, отвердитель, модификатор) в соответствующих пропорциях подаются отдельно насосами-дозаторами в лабиринтную мешалку, где происходит смешивание компонентов клея между собой и образование однородного клеевого состава. При необходимости в клеевой состав дополнительно может быть введен растворитель для снижения вязкости раствора и специальные добавки (антисептики, антипирены и др.). Из лабиринтной мешалки подготовленное связующее подается в высокооборотный смеситель на стадию осмоления костры. Осмоленная костра направляется на формирование ковра плиты и его горячее прессование.

Экспериментально установлено, что физико-механические свойства плитных материалов на основе костры, а также на основе совмещенных наполнителей (древесины и костры в различных соотношениях) при применении данных клеев существенно увеличиваются, что объясняется повышением равномерности распределения связующего по поверхности частиц, а также повышением адгезионных свойств.

### Библиографический список

1. Зимон, А.Д. Адгезия жидкости и смачивание / А.Д. Зимон. – М.: Химия, 1974. – 416 с.
2. Дерягин, Б.В. Адгезия твердых тел / Б.В. Дерягин, Н.А. Кротова, В.П. Смилга. – М.: Наука, 1973. – 279 с.
3. Берлин, А.А. Основы адгезии полимеров / А.А. Берлин, В.Е. Басин. – М.: Химия, 1974. – 392 с.
4. Басин, В.Е. Адгезионная прочность / В.Е. Басин. – М.: Химия, 1981. – 208 с.
5. Липатов, Ю.С. Межфазные явления в полимерах / Ю.С. Липатов. – Киев: Наукова думка, 1980. – 259 с.
6. Угрюмов, С.А. Повышение эксплуатационных характеристик костроплит путем модификации карбамидоформальдегидного связующего поливинилацетатной дисперсией / С.А. Угрюмов, В.Е. Цветков // Клеи. Герметики. Технологии. – М.: Наука и технологии, 2008. – № 5. – С. 20–24.

## СИНТЕЗ ХИМИЧЕСКИХ ПРОДУКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДРЕВЕСНОЙ ПИРОЛИЗНОЙ ЖИДКОСТИ

С.А. ЗАБЕЛКИН, *асс. каф. химической технологии древесины КНИТУ*,  
Г.М. ФАЙЗРАХМАНОВА, *асп. каф. химической технологии древесины КНИТУ*,  
Л.Н. ГЕРКЕ, *доц. каф. химической технологии древесины КНИТУ, канд. техн. наук*,  
А.Н. ГРАЧЕВ, *доц. каф. переработки древесных материалов КНИТУ, канд. техн. наук*,  
В.Н. БАШКИРОВ, *проф. каф. химической технологии древесины КНИТУ, д-р техн. наук*

*szabelkin@gmail.com, ke4kene@yandex.ru, larinick@yandex.ru*

Целью данной работы является исследование процесса переработки пиролизной жидкости в химические товарные продукты. Использование пиролизной жидкости в качестве сырья для химического производства позволит получать широкий спектр товарных продуктов.

Исследуемая пиролизная жидкость была получена методом быстрого абляция-

ного пиролиза древесины сосны на установке УБП-1 [1] (рис. 1).

Установка позволяет перерабатывать биомассу, в т.ч. низкокачественную древесину и отходы деревообработки, с получением мелкодисперсного угля, горючего газа и пиролизной жидкости. Физические свойства жидкого продукта быстрого пиролиза отходов древесины сосны представлены в табл. 1.



Рис. 1. Внешний вид установки УБП-1

С целью изучения процессов получения товарных продуктов при реализации данного этапа были проведены экспериментальные исследования свойств и режимных параметров процессов переработки пиролизной жидкости в следующие товарные продукты: смолы древесные омыленные, фенолформальдегидные смолы, пленкообразующие материалы.

Т а б л и ц а 1

**Физические свойства пиролизной жидкости**

Показатель	Величина
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1200
Низшая теплота сгорания, МДж/кг	20,2
Вязкость, сСт	13–250
Зольность, %	0,14
Температура вспышки в открытом тигле, °С	113
Температура начала кипения, °С	110
Кислотное число, мг КОН/г	1,2
pH	2–3,7

Т а б л и ц а 2

**Химический состав пиролизной жидкости**

Класс соединения	Содержание, %
Альдегиды	9,8
Ароматические углеводороды	2,1
Кетоны	16,4
Кислоты	8,2
Моносахариды	9,7
Полициклические углеводороды	0,1
Сложные эфиры	3,1
Спирты	1,3
Фенолы	30,2
Фураны	0,5
Не идентифицировано	18,6

Т а б л и ц а 3

**Сравнительные характеристики полученных резольных смол**

Характеристика	Немодифицированная ФФС	Модифицированная* пиролизной жидкостью резольная смола
Цвет	Желтый	Коричневый
pH	4,6	5,5
Сухой остаток, %	99,3	98,5
Температура затвердевания, °С	160	160

\*50 % фенола замещено пиролизной жидкостью

Исследование химического состава жидкого продукта быстрого пиролиза методом жидкостной хроматографии производилось на хромато-масс-спектрометре «*Turbo Mass Gold*» фирмы «*Perkin Elmer*» с использованием капиллярной трубки «*Elite-5ms*» длиной 30 м и внутренним диаметром 0,2 мм. Идентификация органических соединений проводилась с использованием библиотек масс-спектров *Nist* и *Nbs*. Результаты исследования показали, что содержание фенольной фракции в жидком продукте быстрого пиролиза составляет 30,2 %. Химический состав жидкого продукта быстрого пиролиза представлен в табл. 2.

Пиролизная жидкость уже применяется в различных отраслях промышленности как возобновляемое топливо, в производстве ванилина, при получении копильных жидкостей, в производстве стекольных замазок и в некоторых отраслях строительства. Но все же область применения жидких продуктов быстрого пиролиза древесины требует дальнейшего изучения и проработки. Одним из направлений применения жидких продуктов быстрого пиролиза древесины является модификация фенолформальдегидных смол. Использование отходов деревообрабатывающих производств в виде пиролизной жидкости расширяет сырьевую базу производства фенолформальдегидных смол.

Синтез резольной смолы производился в щелочной среде при мольном соотношении фенола к формальдегиду как 1 : 1,5. Для этого в круглодонную трехгорлую колбу, оснащенную перемешивающим устройством, термометром и обратным холодильником, загружали фенол (1 моль, 94 г), формальдегид (1,5 моля, 123 г 37 %-ного водного раствора) и октагидрат гидроокиси бария (0,015 мол, 4,7 г). Смесь перемешивали при 70 °С в течении 2 ч. По окончании реакции перемешивание прекращали, реакционную массу охлаждали при комнатной температуре. Гидроокись бария нейтрализовалась добавлением 10 %-ой серной кислоты в количестве, соответствующей pH 6–7. Образующаяся вода отгонялась под вакуумом с помощью водоструйного насоса, при температуре в колбе не выше 70 °С. Каждые 30 мин. отбиралась проба смолы. От-

гонка прекращалась после достижения смолой необходимой консистенции при комнатной температуре.

Синтез фенолформальдегидной смолы (ФФС) осуществлялся по стандартной методике при замещении 50 % фенола на жидкие продукты быстрого пиролиза древесины [2]. Полученная модифицированная ФФС является резольной смолой в стадии, при которой продукт размягчается при нагревании, но не плавится и с трудом растворяется.

Таким образом, использование пиролизной жидкости в качестве альтернативы фенола в производстве фенолоформальдегидных смол является одним из перспективных направлений. Модифицированная пиролизной жидкостью фенолформальдегидная смола имеет приемлемые качественные характеристики при значительном снижении стоимости и токсичности. Учитывая, что пиролизная жидкость может быть получена из древесных отходов и низкокачественной древесины, данная технология может быть востребована на ряде предприятий деревообрабатывающей и лесной отрасли при производстве композиционных материалов. Замещение фенола при синтезе ФФС пиролизной жидкостью снижает стоимость полученной смолы на 29,6 %.

Смола древесная омыленная (СДО) является лесохимическим продуктом, получаемым из древесной смолы. СДО применяется в качестве воздухововлекающей и пластифицирующей добавки в бетон с целью уменьшения расхода цемента. Пиролизная жидкость, как и древесная смола, используемая для производства СДО, содержит значительное количество жирных и смоляных кислот, определяющих свойства СДО. Учитывая данное обстоятельство, провели исследование процесса переработки пиролизной жидкости в смолу древесную омыленную.

СДО получают методом частичного омыления пиролизной жидкости едким натром. Для этого в реакторе вначале готовится 20 %-ный водный раствор едкого натра. После этого в готовый раствор добавляют равное по массе количество пиролизной жидкости и осуществляют процесс ее омыления при непрерывном перемешивании в течение 2 ч.

Для определения режимных параметров процесса получения СДО была проведена серия экспериментов. При этом изменялось соотношение пиролизной жидкости и щелочи (NaOH). Исследования свойств полученной СДО производились в соответствии с ТУ 13-05-02-83 (Смола древесная омыленная СДО). Для сравнения также было проведено определение свойств покупной СДО, произведенной Амзинским лесокомбинатом.

Для проведения анализа был приготовлен 10 %-ный водный раствор СДО. Основными определяемыми свойствами являлись плотность и пенообразующая способность СДО. Измерение плотности 10 %-го водного раствора СДО проводилось в соответствии с ТУ 13-05-02-83. Результаты исследований представлены на диаграммах (рис. 1 и 2).

Кроме того, были проведены исследования влияния теплового воздействия при производстве СДО. Полученные результаты показали существенное снижение пенообразующей способности при нагревании смеси. Это объясняется процессами полимеризации и поликонденсации соединений, входящих в состав пиролизной жидкости, при нагреве. Также актуальным направлением дальнейших исследований является изучение влияния фракционирования пиролизной жидкости перед ее переработкой в СДО.

В результате проведения данных исследований были определены оптимальные режимные параметры процесса получения СДО. Исследования показали, что требованиям технических условий соответствует СДО, полученная при соотношении пиролизной жидкости и щелочи 2 к 1.

Таким образом, при переработке пиролизной жидкости в СДО можно добиться приемлемых качественных показателей при соблюдении необходимых режимных параметров.

Одним из перспективных направлений использования пиролизной жидкости является ее переработка с получением защитно-декоративных покрытий. Выпуск материалов лакокрасочных на основе полимеров в 2010 г. достиг 823,5 тыс. т, что на 6,9 % больше, чем

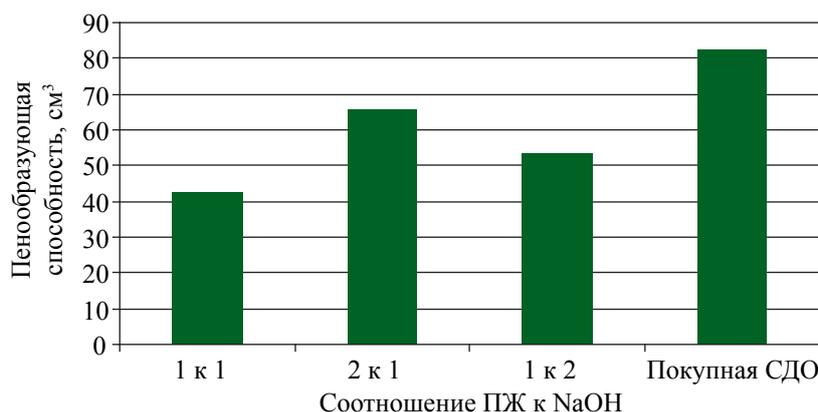


Рис. 2. Пенообразующая способность СДО в зависимости от соотношения пиролизной жидкости и щелочи. Штриховой линией отмечено минимальное значение согласно ТУ 13-05-02-83

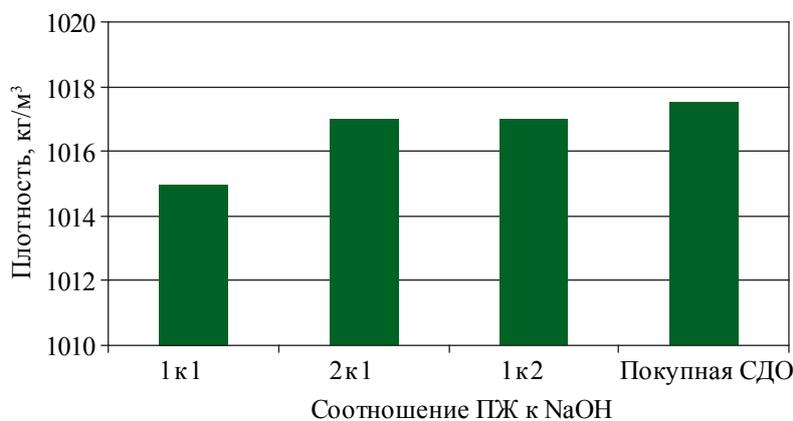


Рис. 3. Плотность СДО в зависимости от соотношения пиролизной жидкости и щелочи. Штриховой линией отмечено значение согласно ТУ 13-05-02-83

в 2009 г. При этом темп роста выпуска материалов лакокрасочных на основе полимеров в 2010 г. стал увеличиваться.

В связи с этим возможны следующие подходы к организации пленки:

- приготовление новолачных синтетических смол на основе пиролизной жидкости;
- выделение из пиролизной жидкости пленкообразующих компонентов;
- термоокислительная модификация пиролизной жидкости с целью получения древесносмоляного пека.

С целью оценки возможности различных вариантов применения пиролизной жидкости были проведены исследования каждого из них.

Содержащиеся в пиролизной жидкости фенольные соединения могут быть использованы и при производстве фенолфор-

мальдегидных новолачных смол, отверждение которых осуществляется при добавлении уротропина и формалина.

Новолачные фенолформальдегидные смолы были получены в результате реакции формальдегида с фенолом при молярном соотношении фенол: формальдегид около 1 : 0,8 в кислой среде. Была проведена серия исследований по замещению части или всего фенола на пиролизную жидкость. При этом в реактор загружались формальдегид и пиролизная жидкость в соответствии с требуемым молярным соотношением, добавлялись щавелевая кислота и вода, смесь кипятилась в течение 1,5 ч. После этого смесь охлаждалась и удалялся верхний водный слой. Затем происходила отгонка воды с постепенным повышением температуры до 120°C.

Экспериментальные исследования показали, что наиболее устойчивые покрытия

получаются при полном замещении фенола пиролизной жидкостью.

Полученная смола может быть отверждена только с добавлением катализатора. При проведении исследований были использованы уротропин и формалин. Пленки из полученных смол были исследованы на растворимость в различных жидкостях (вода, толуол, спирт). Результаты исследований показали достаточную устойчивость в растворителях.

Таким образом, исследование использования новолачной смолы в качестве пленкообразователя показало весьма многообещающие результаты.

Пиролизная жидкость содержит водонерастворимые компоненты, смолы, олигомеры лигнина, которые могут применяться в качестве компонентов и модификаторов лакокрасочных покрытий. Выделение данных компонентов осуществлялось жидкостной экстракцией дистиллированной водой. В результате такой обработки в воду переходят кислоты и некоторые другие водорастворимые вещества, повышая водостойкость будущего защитно-декоративного покрытия. Нерастворимая в воде часть конденсированного продукта растворяется в этаноле либо в другом растворителе (в нашем случае исследования проводились на этиловом спирте и смесевом растворителе № 646) до вязкости, определяемой технологическими требованиями и интенсивностью цветовой окраски. В зависимости от количества растворителя цветовая гамма изменялась от темного красно-коричневого почти черного до соломенного. Необходимо отметить невысокую в сравнении с распространенными лакокрасочными составами механическую прочность полученного покрытия. Но экспериментально была под-

тверждена возможность значительного увеличения механической прочности покрытия и его защитных свойств в результате кратковременного воздействия высоких температур. В проведенных исследованиях обработанная данным составом поверхность образца после удаления большей части растворителя (сушки в течение часа при температуре 25°C) подвергалась обдуву воздухом, нагретым до температуры 200°C в течение 5–7 мин. и даже обработки открытым пламенем газовой горелки в течение нескольких секунд. В результате высокотемпературного воздействия на поверхности образуется глянцевое покрытие достаточной механической прочности, обладающее хорошими защитными свойствами. Вследствие специфического запаха данное покрытие может быть рекомендовано лишь для эксплуатации на открытом воздухе.

Проведенные исследования подтвердили возможность использования жидких продуктов быстрого пиролиза древесины в качестве химического сырья для производства товарных продуктов: СДО, фенолформальдегидной смолы, пленкообразующих материалов. Каждый из исследуемых продуктов соответствует нормированным техническим требованиям при соблюдении необходимых режимных параметров производства.

#### Библиографический список

1. Забелкин, С.А. Энергетическое использование жидких продуктов быстрого пиролиза / С.А. Забелкин, Д.В. Тунцев, А.Н. Грачев, В.Н. Башкиров // Вестник МГУЛ – Лесной вестник – 2010. – № 4. – С. 79–84.
2. Nakos, P. Wood Adhesives Made with Pyrolysis Oils / Panagiotis Nakos, Sophia Tsiantzi, Eleftheria Athanassiadou // PyNe Newsletter, Aston University, Birmingham, UK. – 2000. – Vol. 10. – P. 10–11.

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ НАНОМАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ЛЕСНЫХ МАШИН ОТ КОРРОЗИИ ПРИ ХРАНЕНИИ

В.В. БЫКОВ, *проф. каф. технологии машиностроения и ремонта МГУЛ, д-р техн. наук,*  
М.И. ГОЛУБЕВ, *асп. каф. технологии машиностроения и ремонта МГУЛ*

*bykov@mgul.ac.ru*

Эффективность использования парка лесных машин (коэффициент технической готовности, простой) во многом определяется функционированием системы их технического обслуживания и ремонта (СТОИР). В «Положении о техническом обслуживании и ремонте машин и оборудования лесозаготовительной промышленности» к основным техническим воздействиям отнесено хранение техники и ее защита от коррозии. Для машин, используемых в лесном хозяйстве, характерна сезонность и небольшая занятость в году. Например, плуги, бороны, культиваторы, опрыскиватели и другие прицепные машины используются в течение всего нескольких смен. В остальное время они находятся на хранении, преимущественно на открытых площадках, подвергаясь воздействию дождя, снега, солнечной радиации и других факторов. Это способствует разрушению лакокрасочных покрытий и протеканию на поверхностях машин коррозионных процессов.

Нами проведено обследование лесных машин на поражение коррозией при хранении в Тверской, Московской, Пензенской, Орловской областях и Республике Мордовия. Результаты обследования показали, что наиболее подвержены коррозии обшивка и конструкции из тонколистовой стали, зубья звездочек и втулочно-роликовые цепи, сварные и резьбовые соединения, рабочие органы почвообрабатывающих машин (лемехи плугов, лапы культиваторов) и другие элементы. По данным Е.А. Пучина и С.М. Гайдара, через три года эксплуатации прицепных машин коррозионному воздействию подвержены 70–80 % деталей и узлов. Например, у тракторов К-701, которые широко используются в лесном хозяйстве, при поступлении в капитальный ремонт коррозионным разрушениям подвергнуты 150 наименований узлов и деталей. По данным

обследования, площадь коррозионных поражений составляет от 15 до 90 % поверхности. Интенсивно подвергаются коррозии лемехи плугов. Например, глубина коррозии незащищенного лемеха за год достигает 120 мкм. При этом коррозионные потери составляют в среднем 25–35 г на лемех или 1,5–2 % его общей массы. Особенно велики потери от коррозии тонколистовых конструкций машин. За девять лет эксплуатации средние потери от коррозии тонколистовых конструкций достигают 20–30 % от их массы. При коррозии резьбовых соединений, характерной для лесных машин, значительно возрастает трудоемкость ремонтных работ. Поэтому эффективность использования лесохозяйственной техники во многом зависит от качества выполнения работ по их сохранности и, прежде всего, противокоррозионных мероприятий.

В настоящее время разработано много консервационных материалов, различающихся эффективностью защиты от коррозии, долговечностью (сроком службы) и стоимостью. Использование товарных консервационных составов требует больших затрат, а применение растительных масел в качестве консервационных составов нецелесообразно из-за продовольственного кризиса в мире. Экономически целесообразно использование консервационных составов второго поколения (полученных не из товарных растительных масел, а из отходов их производства), а также отработанных моторных масел. Однако при хранении лесных машин на открытых площадках они смываются атмосферными осадками.

Одним из факторов, влияющих на антикоррозийную защиту, являются смачивающие свойства защитных покрытий. Нами проведены исследования смачивающих свойств консервационных составов на основе отработанного моторного масла и отходов произ-

Т а б л и ц а 1

**Смачивающие свойства консервационных составов**

Консервационный состав	Кинематическая вязкость, мм <sup>2</sup> /с	Диаметр пятна растекания, мм
Отработанное моторное масло	22,0	24,5
Отработанное моторное масло с добавлением нанопорошка бемита	22,0	22,0
Отходы производства растительных масел:		
подсолнечного	13,8	19,0
подсолнечного с добавлением нанопорошка бемита	13,8	15,5
рапсового	16,7	14,0
рапсового с добавлением нанопорошка бемита	16,7	10,0
Соевого	12,3	19,5
соевого с добавлением нанопорошка бемита	12,3	18,0
Ингибитор коррозии на основе синтеза отходов производства рапсового масла	49,0	28,0

Т а б л и ц а 2

**Результаты испытаний сравнительной стойкости консервационных составов на основе отходов производства растительных масел к смыванию атмосферными осадками**

Консервационный состав	Масса образца с покрытием до орошения, г	Масса смыва покрытия, г
Отработанное моторное масло	39,248	0,005
Отработанное моторное масло с добавлением нанопорошка бемита	40,560	0,005
Отходы производства растительных масел:		
подсолнечного	40,379	0,007
подсолнечного с добавлением нанопорошка бемита	40,418	0,007
рапсового масла	40,316	0,005
рапсового масла с добавлением нанопорошка бемита	40,237	0,006
соевого масла	40,266	0,006
соевого масла с добавлением нанопорошка бемита	40,214	0,005
Ингибитор коррозии на основе синтеза отходов производства рапсового масла	39,352	0,004

водства растительных масел (подсолнечного, рапсового и соевого) с добавлением наночастиц бемита. Характеристикой смачиваемости служит диаметр пятна растекания капли, нанесенной на стальную поверхность. Результаты исследований приведены в табл. 1.

Исследования показывают, что при добавлении в консервационные составы нанопорошка бемита их смачивающие свойства ухудшаются. Из исследованных составов лучше всего смачивают стальную поверхность составы на основе отработанного моторного масла.

Для повышения смачиваемости поверхностей, защищаемых от коррозии, нами разработан ингибитор коррозии, полученный на основе синтеза отходов производства рапсового масла. Он обеспечивает лучшую смачиваемость стальной поверхности, чем консер-

вационные составы на основе отработанного моторного масла и отходов производства растительных масел.

Важным качеством консервационных составов является стойкость к смыванию атмосферными осадками. Сравнительную стойкость консервационных составов определяли путем их орошения при одинаковой интенсивности дождя под душем в следующей последовательности:

- 8 часов при температуре воды от 50 до 55° С;
- 1 час при температуре воды от 10 до 15° С;
- 2 часа при температуре воды от 50 до 55° С;
- 1 час при температуре воды от 10 до 15° С.

Затем образцы переворачивали и цикл повторяли. После орошения образцы выдерживали 16 часов при комнатной температуре и взвешивали. Критерием стойкости покрытий к смыванию служила разница в массе образцов до и после орошения. Результаты испытаний сравнительной стойкости покрытий к смыванию атмосферными осадками приведены в табл. 2.

Исследования показывают, что при добавлении в консервационные составы нанопорошка бемита их стойкость к смыванию практически не изменяется. Из исследованных составов лучшую стойкость к смыванию осадками имеет ингибитор коррозии, полученный на основе синтеза отходов производства рапсового масла.

В настоящее время коррозионная стойкость ингибитора коррозии исследуется путем

проведения длительных натуральных испытаний стальных образцов на открытых площадках в различных лесных регионах страны.

### Библиографический список

1. Щеглов, Е.В. Совершенствование технологии обслуживания втулочно-роликовых цепей зерноуборочных комбайнов: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.20.03 / Е.В. Щеглов. – М.: ГОСНИТИ, 2008 – 16 с.
2. Петрашев, А.И. Совершенствование технологических процессов и ресурсосберегающих средств консервации сельскохозяйственной техники при хранении: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.20.03 / А.И. Петрашев. – Саратов: Саратовский ГАУ им. Н.И.Вавилова, 2008 – 48 с.
3. Вавилкин, Д.Ю. Обеспечение сохранности сельскохозяйственной техники путем подбора антикоррозионных материалов: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.20.03 / Д.Ю. Вавилкин. – Саранск: Мордовский ГУ им. Н.П. Огарева, 2011 – 17 с.

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ НАНОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ДОБАВОК В СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ ЛЕСНОГО КОМПЛЕКСА

С.М. ГАЙДАР, доц. каф. ремонта и надежности машин МГАУ им. В.П. Горячкина, д-р техн. наук

*avtokon93@yandex.ru*

**Н**анотехнология позволяет создать материалы и структуры, в которых проявляются новые существенно улучшенные физико-химические свойства и функции, с использованием наноразмерных объектов (от 1 до 100 нм) [1, 2].

За счет применения наноматериалов в качестве добавок в смазочные материалы можно добиться значительного увеличения ресурса работы машин и оборудования, а также снижения эксплуатационных затрат (в т.ч. расхода топлива), улучшения технических показателей (снижения шума и вибраций, вредных выбросов).

Используя нанотехнологии, можно управлять свойствами макрообъектов, осуществляя контроль структуры наноматериалов на молекулярном уровне. В общем случае подобный контроль реализуется как последовательность операций с участием специально

сконструированных химических соединений и их агрегатов. Поскольку эти операции осуществляются в наномасштабах и с трудом поддаются внешнему управлению, первоочередная задача нанотехнологии – получать молекулярные структуры, которые способны к самопроизвольной сборке и функционированию. Для получения таких химических соединений использованы: карбоновые кислоты  $C_nH_{2n+1}COOH$ , аминспирт  $HN(CH_2CH_2OH)_2$  и борная кислота  $H_3BO_3$ .

Ступенчатый химический синтез позволяет получить макромолекулы строго контролируемой структуры и размеров. Он представляет собой многократно повторяемую последовательность реакций многофункциональных мономеров. В общем виде структурная формула молекулы бората этаноламида карбоновых кислот (БЭКК) для  $n$  ступеней будет иметь вид [3, 4].

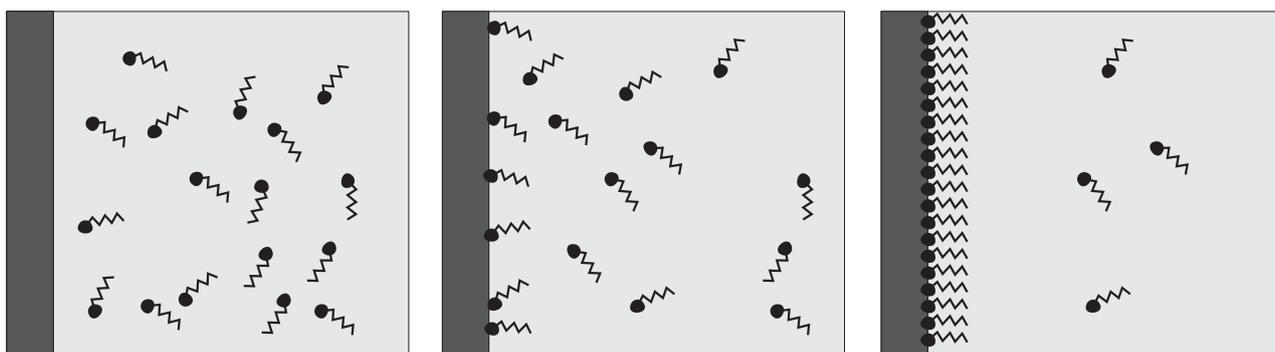
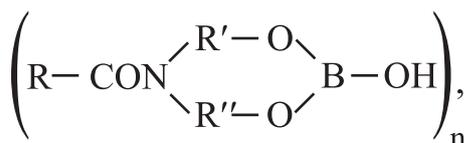


Рис. 1. Процесс формирования монослоя ориентированных амфифильных молекул на поверхности твердого тела



где R — (CH<sub>3</sub>-CH<sub>2</sub>...-CH<sub>2</sub>-)  
 R', R'' — (-CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-)

Особенностью этой молекулы является ее амфифильный характер. Она представляет собой длинную молекулярную цепочку (CH<sub>3</sub>-CH<sub>2</sub>-...-CH<sub>2</sub>-), обладающую ярко выраженными гидрофобными свойствами и обеспечивающую растворимость в углеводородах. На конце молекулы имеется гидрофильная группа -ОН, являющаяся структурной компонентной. Структурные компоненты обеспечивают сборку молекул на поверхности твердого тела за счет межмолекулярного взаимодействия (рис. 1).

Молекулярная цепочка является активной компонентой и обеспечивает улучшение свойств смазочных материалов при определенных условиях. Амфифильные молекулы формируют на поверхности раздела двух фаз «твердая поверхность трибосопряжения – смазочная композиция» (раствор нанодобавки в углеводородах) новую фазу: суперполимеры в виде пленки толщиной около 3 нм, представляющие собой супрамолекулярные ансамбли. В состав супрамолекулярных ансамблей входят амфифильные молекулы, молекулы углеводородного растворителя (смазочные материалы) и твердая поверхность, обладающая поверхностной энергией. Самосборка амфифильных молекул на твердой поверхности происходит в нужной последовательности и с определенной ориента-

цией. Большое значение имеет концентрация раствора нанодобавки. Одновременно должны быть обеспечены молекулярная подвижность и насыщение мономолекулярного слоя на поверхности. Твердая поверхность имеет неоднородное силовое поле, в каждой точке отличающееся как по силе, так и по знаку. Происходит считывание информации одной компоненты химической структуры другой, поэтому самосборку рассматривают как межмолекулярный обмен структурной информацией и называют молекулярным распознаванием.

Насыщение твердой поверхности обеспечивает плотную упаковку амфифильных молекул (площадь твердой поверхности на одну молекулу ~ 0,2 мм<sup>2</sup>), что позволяет получить квазикристаллическую структуру. Такие пленки обладают большой механической прочностью, они способны выдерживать давления до 10<sup>6</sup> Г/см<sup>2</sup> [5].

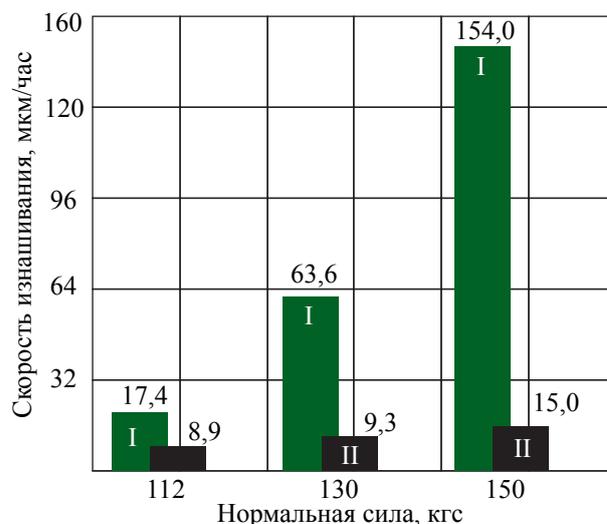


Рис. 2. Зависимость скорости изнашивания колodки от величины нормальной силы

Экспериментальные исследования по определению противоизносных свойств смазочных композиций были проведены на стандартной машине трения типа «Амслер–МИ». Схема трения «колодка–ролик», обеспечивающая постоянную величину коэффициентов взаимного перекрытия и площади соприкосновения независимо от износа.

Объекты испытаний: контрольный образец – масло ТМ-5-18 (I), опытный – 90 % масло ТМ-5-18+10 % БЭКК (II). Результаты испытаний представлены на рис. 2 [6].

Анализ результатов показал высокую защитную эффективность полученных органических наноматериалов за счет наномодифицирования поверхностей трибосопряжений, скорость изнашивания при нормальной нагрузке в 150 кгс уменьшилась в 10 раз. Таким образом, нанотехнологические добавки в смазочные материалы могут быть использованы для управления их свойствами на молекулярном уровне. Это управление основано на процессах самосборки и самоорганизации.

## Библиографический список

1. Гайдар, С.М. Характеристика и показатели наноматериалов для снижения износа деталей сельхозмашин / С.М. Гайдар // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2009. – № 12. – С. 20–22.
2. Гайдар, С.М. Характеристика и показатели наноматериалов / С.М. Гайдар // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2010. – № 2. – С. 26–28.
3. Присадка к смазочным маслам: пат. 2368647. Рос. Федерация: МПК С10М141/12 / С.М. Гайдар, В.А. Лазарев.; заявитель и патентообладатель Гайдар С.М. – № 2008122012/04; заявл. 03.06.08.; опубл. 27.09.09. Бюл. № 27. – 4 с.
4. Присадка к смазочным материалам: пат. 2375417. Рос. Федерация: МПК С10М141/12 / С.М. Гайдар, В.А. Лазарев; заявитель и патентообладатель Гайдар С.М. – № 2008122011/04; заявл. 03.06.08.; опубл. 10.12.09. Бюл. № 34. – 4 с.
5. Ахматов, А.С. Молекулярная физика граничного трения / А.С. Ахматов. – М.: Физматгиз, 1963. – 472 с.
6. Гайдар, С.М. Применение нанотехнологий для повышения надежности машин и механизмов / С.М. Гайдар // Грузовик. – 2010. – № 10. – С. 38–41.

## КОНЦЕПЦИЯ СОЗДАНИЯ ИНГИБИТОРОВ КОРРОЗИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАНОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ

С.М. ГАЙДАР, доц. каф. ремонта и надежности машин МГАУ им. В.П. Горячкина, д-р техн. наук,  
Р.К. НИЗАМОВ, асп. каф. ремонта и надежности машин МГАУ им. В.П. Горячкина,  
М.И. ГОЛУБЕВ, асп. каф. технологии машиностроения и ремонта МГУЛ

*avtokon93@yandex.ru*

Такие физико-химические процессы, как электрохимическая и химическая коррозия, происходят на границе раздела фаз твердое тело–жидкость и твердое тело–газ.

Любая гетерогенная система обладает поверхностью раздела фаз и характеризуется поверхностной энергией. Возможность изменять поверхностную энергию позволяет влиять на эти процессы.

Существуют сложные органические молекулы, в которых каждый атом, каждая группа атомов играет индивидуальную роль. В результате адсорбции таких молекул из раствора на поверхности понижается поверхностная энергия. Такие молекулы называют поверхностно-активными [1].

Уравнение Гиббса характеризует меру способности понижать свободную поверхностную энергию на данной поверхности раздела

$$\Gamma = -\frac{c}{RT} \frac{d\sigma}{dc},$$

где  $\Gamma$  – концентрация адсорбируемых молекул на единице площади;

$R$  – универсальная газовая постоянная;

$T$  – абсолютная температура;

$c$  – концентрация молекул в растворе;

$d\sigma / dc$  – производная поверхностной энергии по концентрации.

Процесс адсорбции молекул на поверхности осуществляется за счет электростатического и ванн-дер-ваальсовских взаимо-

действий, водородных и координационных связей.

В физико-химической системе раствор поверхностно-активных молекул – поверхность твердого тела наблюдается явление «самосборка». Т.е. формирование упорядоченной структуры в виде насыщенного мономолекулярного слоя молекул на поверхности из раствора, где они совершали хаотическое движение, без внешнего воздействия [2].

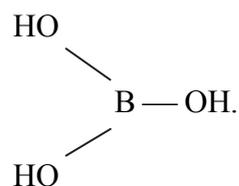
Для получения поверхностно-активных молекул используется ступенчатый синтез, что дает возможность получить молекулы строго контролируемой структуры и размеров. Он представляет собой многократно повторяемую последовательность реакций многофункциональных мономеров.

В нашем случае были использованы следующие мономеры [3]:

– карбоновые кислоты  $RCOOH$ , где  $R$  – гидрофобный радикал  $(CH_3-CH_2-CH_2-)_n$ , имеющий пилообразное строение,

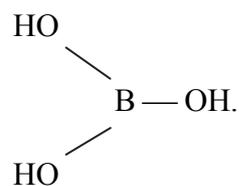
– моноэтаноламин –  $H_2NR'OH$ , где  $R'-(CH_2-CH_2-)$ .

Для «сшивки» молекул использована борная кислота  $H_3BO_3$ , структурная формула которой



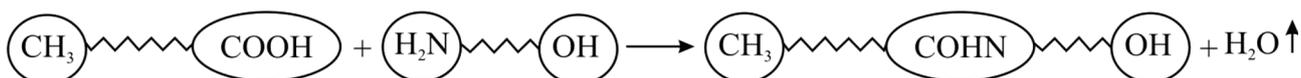
Ступенчатый синтез молекулы ингибитора коррозии осуществляется по схеме (рис. 1) [1].

Далее реакция происходит аналогично, размер молекулы удваивается на каждой стадии за счет «сшивки» двух гидроксильных групп ( $-OH$ ) молекулой



В результате синтеза получено органическое соединение с ассиметричной молекулярной структурой, содержащее гидрофобный радикал и гидрофильную часть – борат этаноламида карбоновой кислоты (БЭКК). Молекула содержит два вида функциональных групп: амидную ( $-COHN-$ ) и гидроксильную ( $-OH$ ), которые обуславливают адсорбционную активность (рис. 2).

1 стадия



2 стадия

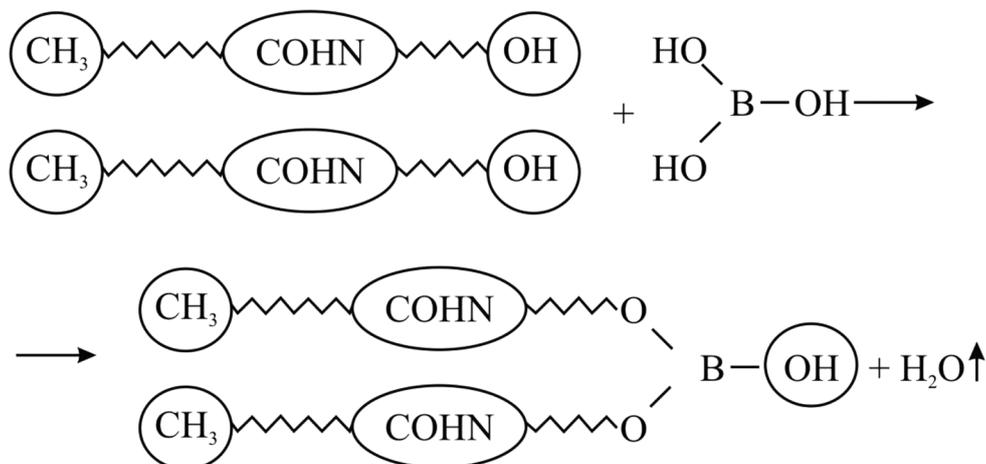


Рис. 1. Схема ступенчатого синтеза молекулы ингибитора коррозии

Результаты электрохимических измерений на стали Ст.3, покрытой пленками И-20А с БЭКК, в 0,5 М растворе NaCl

Исследуемая композиция	Электродный потенциал ( $-E_{кор}$ ), В	Плотность коррозионного тока ( $i_{кор}$ ), А/м <sup>2</sup>	Катодная постоянная Тафеля $b_k$ , мВ	Анодная постоянная Тафеля $b_a$ , мВ	Скорость коррозии $K_{э/х} \cdot 10^{-4}$ , кг/м <sup>2</sup> ч	Защитный эффект Z, %
Масло И-20А	0,47	0,063	100	60	0,670	–
Масло И-20А + 20 % БЭКК	0,06	0,020	100	100	0,207	69

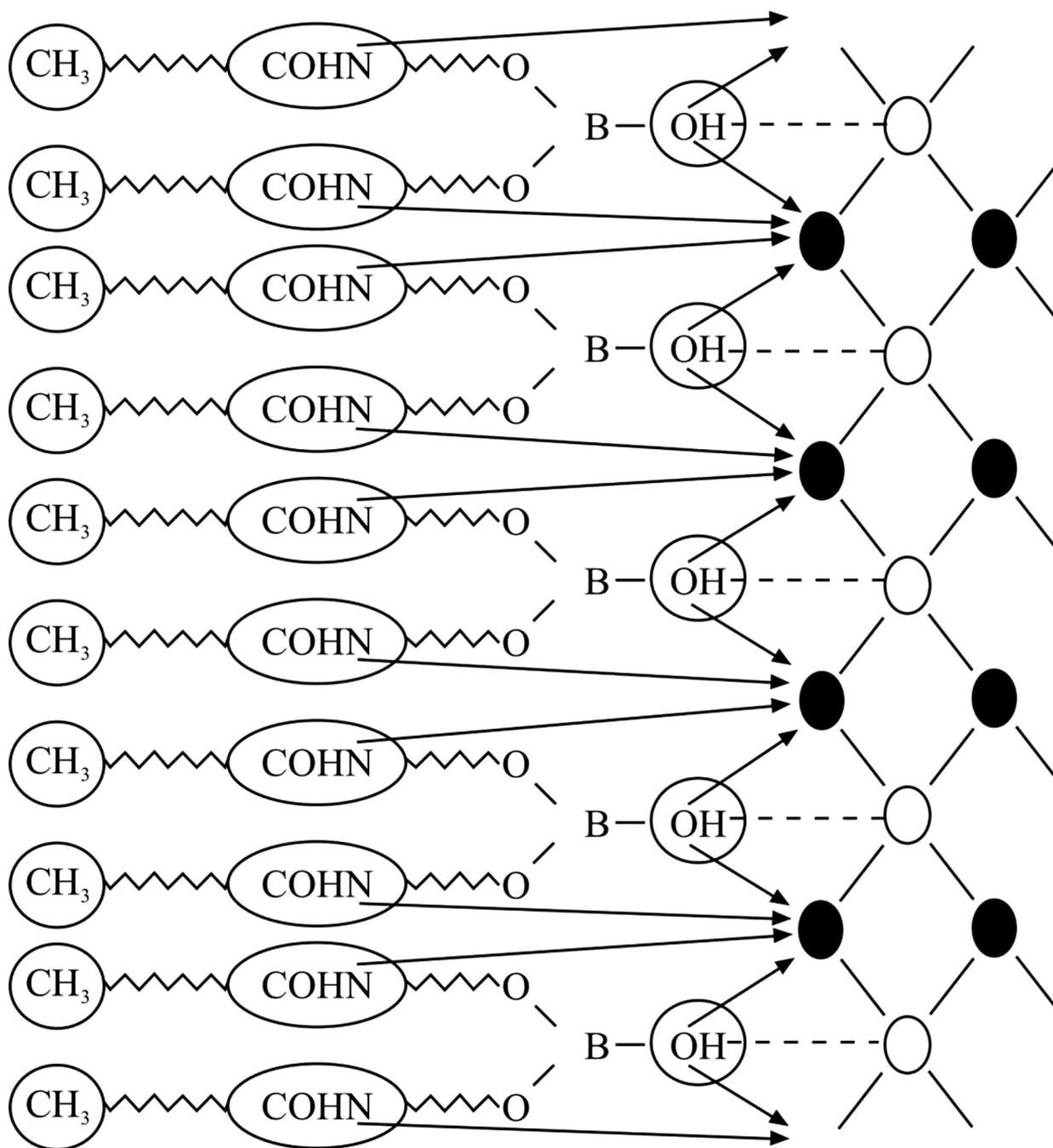


Рис. 2. Схема адсорбционного слоя на поверхности металла:  $\circ$  – ионы кислорода  $O^{2-}$ ,  $\bullet$  – ионы металла  $Me^{2+}$ , ----- водородная связь,  $\rightarrow$  – координационная связь

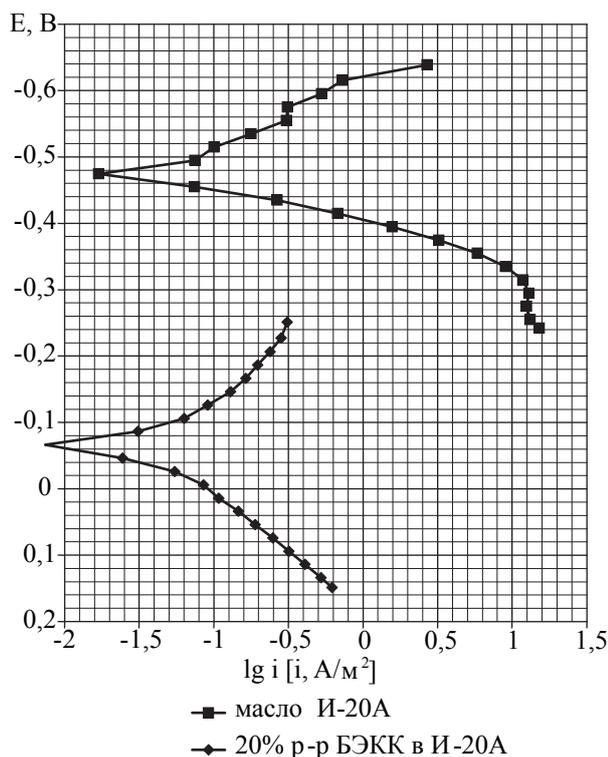


Рис. 3. Поляризационные кривые на стали Ст.3 под слоем:  
1 – масло И-20 А; 2 – масло И-20 А+20 % БЭКК

Для выяснения характера тормозящего действия коррозионного процесса полученным ингибитором были проведены электрохимические исследования. Результаты электрохимических исследований представлены в таблице и на рис. 3.

Таким образом, по результатам электрохимических исследований можно сделать заключение, что ингибитор коррозии обладает защитным действием и является ингибитором анодного действия.

#### Библиографический список

1. Гайдар, С.М. Теория и практика создания ингибиторов коррозии для консервации сельскохозяйственной техники: монография / С.М. Гайдар. – М.: Росинформагротех, 2011. – 304 с.
2. Рамбиди, Н.Г. Физические и химические основы нанотехнологий / Н.Г. Рамбиди, А.В. Березин. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 456 с.
3. Ингибитор атмосферной коррозии металлов: пат. 2283898 РФ: МПК C23F11/00/ С.М. Гайдар – № 2005133751/02; заявл. 02.11.05; опубл. 20.09.06. Бюл. № 26.

## ПОЛИМЕРНЫЕ НАНОКОМПОЗИТЫ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТИРУЮЩИХ МАШИН

В.В. КОЗЫРЕВ, *проф. каф. технической механики ТГТУ, д-р техн. наук,*

Л.В. КОЗЫРЕВА, *ст. преподаватель каф. экологии и безопасности в чрезвычайных ситуациях ТГТУ, канд. техн. наук,*

Н.Н. ЧУПЯТОВ, *и.о. доц. каф. техническая механика ТГТУ, канд. техн. наук*

*kosyrew-tgsxa@rambler.ru*

Повышение надежности современной техники невозможно обеспечить без применения инновационных технологий, которые необходимо использовать на всех стадиях изготовления и эксплуатации быстроизнашивающихся деталей и сборочных единиц подъемно-транспортных машин. Основная роль в решении проблемы создания новейших конструкционных материалов с заданными физико-механическими и эксплуатационными свойствами отводится практическому внедрению научных достижений в области нанотехнологий.

Анализ проводимых в РФ работ [1, 2] дает основания полагать, что одним из наиболее перспективных направлений развития нанотехнологий в краткосрочной перспективе (практическое использование в ближайшие три–десять лет) является получение в промышленных масштабах различных видов наноматериалов и их использование в качестве наполнителей и модифицирующих добавок при создании полимерных нанокompозитов (ПНК).

Благодаря разнообразию возможных вариантов сочетания компонентов ПНК можно добиться целого ряда преимуществ по сравнению с традиционными композитами, в том числе повышения механической прочности, улучшения теплостойкости и химостойкости

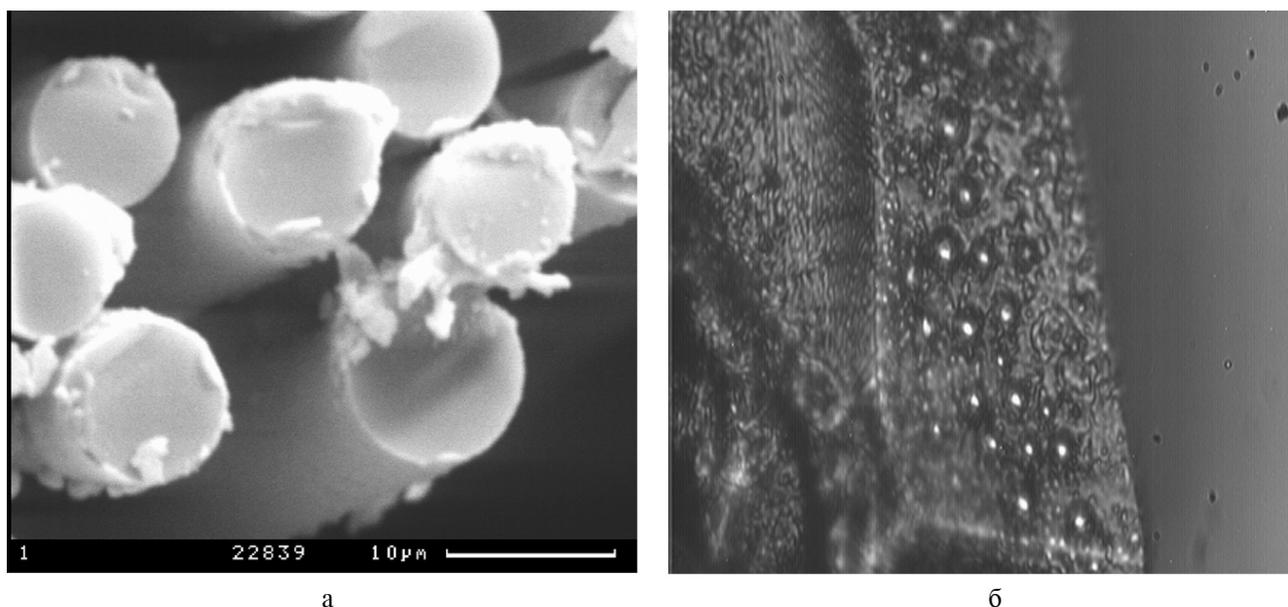


Рис. 1. Внешний вид объектов: а) стеклянные волокна, металлизированные разложением  $Ni(C_5H_5)_2$ ; б) поверхность порошковой частицы ПН-УС25 после металлизации и сульфидирования (площадь сканирования  $25 \times 20$  мкм)

материала, снижения металлоемкости за счет применения полимерных, керамических и углеродных наноструктур, с одновременным ресурсосбережением (достижение необходимых физико-механических характеристик материала при минимальных затратах энергии и реагентов).

В настоящее время большой интерес исследователей вызывает разработка полимерных нанокомпозитов, в которых нанопленки металла (никель, медь, молибден, хром) локализованы на поверхности элементов наполнителя – порошках или волокнах. Это связано с тем, что физические свойства металлических пленок существенно изменяются при переходе к ультратонким слоям толщиной 10...500 нм. Нанопленки характеризуются чрезвычайно развитыми межфазными поверхностями и обладают избыточной по сравнению с однородными материалами энергией, вследствие чего они являются энергонасыщенными стабильными системами.

На рис. 1 представлены внешний вид металлизированных методом химического газофазного осаждения циклопентадиенила никеля –  $Ni(C_5H_5)_2$  стеклянных волокон и поверхность порошковой частицы ПН-УС25 после металлизации и сульфидирования посредством химического газофазного осажде-

ния гексакарбонила молибдена –  $Mo(CO)_6$  в токе сероводорода –  $H_2S$ .

Толщина нанопленок металла на волокне и порошковой частице не превышает 80–100 нм. Данный размер является оптимальным с точки зрения стабилизации системы в зоне межфазных границ подложка – металлическая пленка, изначально характеризующейся ростом напряжений.

Металлизацией элементов наполнителя достигается увеличение теплофизических и трибологических свойств композиционного материала. По результатам стендовых испытаний установлено, что теплопроводность композиционного материала на основе полиамида-66 по сравнению с исходным полимером увеличилась в 8...10 раз. Лучшие результаты в условиях сухого трения при скорости скольжения  $V_c = 0,786$  м/с и нагрузке до 2000 Н наблюдаются у пар, когда в качестве образца используется полиамид-66 с содержанием наполнителя в количестве 10 % по массе –  $K_{тр} = 0,13$ . Износостойкость ПНК увеличивается пропорционально количеству наполнителя покрытого сульфидированной молибденовой пленкой и для высоконаполненных композитов – содержание наполнителя свыше 40 % (масс.) – достигает 3,75.

Армирование металлизированными волокнами и порошками способствует су-



Рис. 2. Детали и сборочные единицы крановой установки МТА-160К: а) подшипник INASL 045014 PPSM механизма подъема груза, восстановленный с использованием вкладыша из полиамида, наполненного металлизированными порошками ПГ-УС25; б) направляющие опоры механизма перемещения стрелы, изготовленные с использованием полиамида, наполненного металлизированными порошками ПГ-УС25

щественному повышению стойкости композиционного материала к химическому и биологическому факторам воздействия среды. В частности, при контакте с органическими средами различной кислотности ( $\text{pH} = 6 \dots 8$ ) износостойкость, адгезионная сдвиговая прочность, усадка и ударная вязкость разработанных стеклопластиков изменяются в допустимых пределах, не превышая 15 % от исходных значений данных параметров [2].

Данные полимерные нанокомпозиты целесообразно применять в процессах восстановления и изготовления деталей трибосопряжений подъемно-транспортных машин, работающих при контакте с агрессивными средами органического происхождения в условиях несовершенной смазки.

В частности, заменой шариковых радиальных однорядных подшипников 60308 в поворотных опорах скребковых навозоборочных транспортерах ТСН-160А на подшипники скольжения с вкладышами из полимерного нанокомпозита достигается увеличение ресурса опоры в 2,5...3 раза.

Примеры восстановленных с использованием полимерных нанокомпозитов деталей и сборочных единиц представлены на рис. 2.

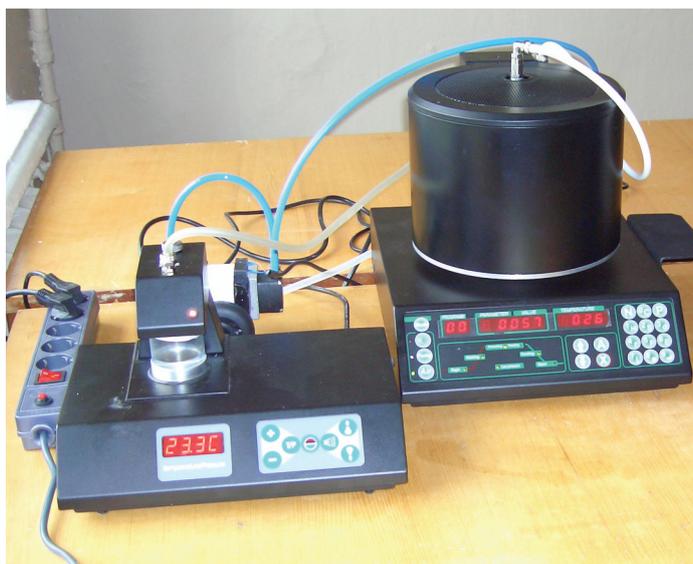
Технологические процессы получения нанопленок металла на подложках различной химической природы осуществляются с целью получения модифицированных элементов армирующей фазы, обладающих оп-

тимальной степенью смачиваемости в полимерной матрице и сниженной реакционной способности поверхностных образований, что способствует улучшению важнейших эксплуатационных характеристик композиции, таких как износостойкость, коэффициент трения, теплопроводность, устойчивость к действию агрессивных сред по сравнению с традиционными материалами.

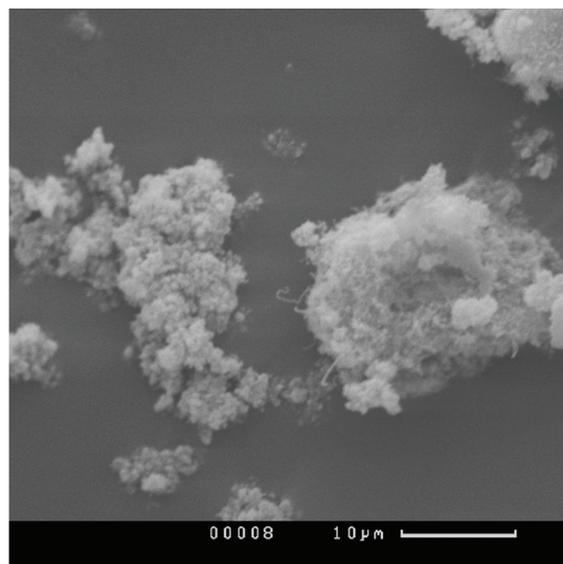
Однако уменьшение структурообразующих частиц пленки до нанометрового размера изменяет исходные свойства вещества не более чем на 20...30 %. Кроме того, при получении изделий из наноматериала трудно сохранить малый размер наноструктур и, соответственно, достигнутый положительный эффект.

Это предопределяет необходимость поиска комплексного подхода к решению поставленных задач, который можно реализовать разработкой нанокомпозитов, где наряду с нанопленками, локализованными на традиционных наполнителях, дополнительно вводятся отдельные наноструктуры, выполняющие роль модифицирующих добавок [2, 3].

К наиболее универсальным наноматериалам с точки зрения разнообразия возможных областей применения принадлежат углеродные нанотрубки (УНТ). Высокие механические свойства УНТ представляют еще большую ценность, когда последние внедряются в матрицу, т.к. они не только усиливают



а



б

Рис. 3. а) установка роста углеродных нанотрубок CVDomna; б) углеродный композит, полученный на установке при температуре 700 °С, давлении 20 кПа

жесткость и упругость материала, но также повышают прочность, то есть способность к сопротивлению образованию трещин.

На рис. 3 представлен внешний вид установки роста углеродных нанотрубок CVDomna, посредством которой создан углеродный композит. Каркасная структура данного наноматериала составлена углеродными нанотрубками, полученными в процессе химического газофазного осаждения этанола на поверхности окисленной сталь-

ной пластинки, выполняющей функцию катализатора.

При введении 1 % (масс.) УНТ твердость полиамида-66 достигает 160 МПа, а теплостойкость – 115 °С, что на 40–50 % выше исходных свойств полимера. При этом износостойкость образцов в парах нанокompозит – сталь 45 составляет 3,75 (рис. 4) [2].

Разработанные полимерные нанокompозиты по сравнению с традиционными аналогами обладают улучшенными физико-механическими и эксплуатационными свойствами, такими как износостойкость, теплостойкость, устойчивость к действию агрессивных сред, что предопределяет эффективность их применения при изготовлении и восстановлении деталей подъемно-транспортных машин в условиях ремонтных предприятий.

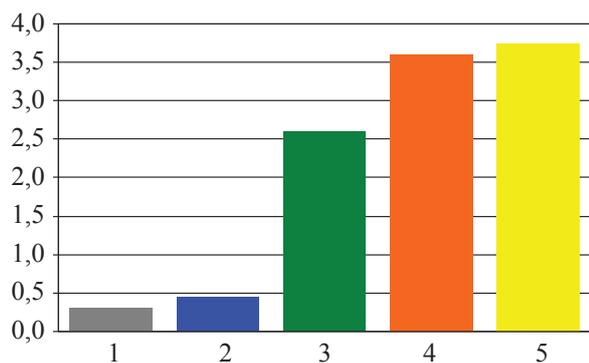


Рис. 4. Износостойкость материалов на основе полиамида-66: 1) ПА-66; 2) ПА-66, наполненный металлизированными стеклянными волокнами – 25 об. %; 3) ПА-66, наполненный металлизированными стеклянными волокнами – 25 об. % и модифицированный углеродными нанотрубками – 1 % (масс.); 4) ПА-66, наполненный сульфидированными порошками ПГ-УС25 – 40 % (масс.); 5) ПА-66, модифицированный углеродным наноматериалом – 1 % (масс.)

### Библиографический список

1. Федеральная целевая программа «Развитие инфраструктуры наноиндустрии в Российской Федерации на 2008–2010 гг.: утв. пост. Правительства РФ 02.09.07. / Матер. сайта <http://fcpnano.ru/>.
2. Козырева, Л.В. Ресурсосберегающие нанотехнологии на предприятиях технического сервиса: монография / Л.В. Козырева. – Тверь: ТГТУ, 2010. – 188 с.
3. Козырев, В.В. Металлоорганические соединения в машиностроении и ремонтном производстве: монография / В.В. Козырев. – Тверь: Студия-С, 2003. – 160 с.

## К ВОПРОСУ ПРИМЕНЕНИЯ НАНОТЕХНОЛОГИЙ И НАНОМАТЕРИАЛОВ В ЛЕСНОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

А.В. СИРОТОВ, *проф. каф. электроэнергетики ЛК МГУЛ, д-р техн. наук,*  
Ю.А. ШАМАРИН, *доц. каф. технологии машиностроения и ремонта МГУЛ, канд. техн. наук,*  
В.И. ПАНФЕРОВ, *доц. каф. электроэнергетики ЛК МГУЛ, канд. техн. наук,*  
К.В. СЕЛИВАНОВ, *асп. каф. электроэнергетики ЛК МГУЛ*

*selivanov@mail.ru*

В современном мире результаты и перспективы работ в области использования нанотехнологий и наноматериалов привели к тому, что во многих странах на уровне правительств, министерств, частных лиц и компаний созданы и весьма успешно выполняются различные программы и исследования в этом направлении. Основная задача этих работ развить путь конечного продукта от центра исследования до рынка.

В частности, только в Европе более чем в 40 крупных лабораториях проводятся разработки и исследования, финансируемые как по государственным, так и по международным программам и грантам [1].

В природе постоянно возникают различные явления, процессы (на нано-, микро- и макроуровнях), связанные с такими фундаментальными науками, как физика, химия, энергетика поверхностей материалов, веществ и частиц. Например, для многих ученых, проводящих исследования, такой процесс, как трение, видится не только разрушительным, но и созидательным, позволяющим разрешить многие вопросы машиностроения, и разработать новые технологии и материалы для восстановления деталей. В последнее время нанотехнологии приходят и в отечественное лесное машиностроение.

В результате проведенного анализа работ в области применения нанотехнологий среди многих направлений можно выделить следующие.

1. Технология восстановления и упрочнения режущего инструмента и штамповой оснастки наноструктурированными покрытиями. Предусматривает восстановление и упрочнение режущих кромок инструмента и штамповой оснастки из стали методом электроискрового упрочнения, стойкость уп-

рочненного инструмента повышается от 2 до 6 раз.

2. Технология обработки сырьевых порошков ионизирующим излучением от линейного ускорителя электронов. Технология предназначена для обеспечения работоспособности рабочих органов при производстве работ по обработке почвы. Позволяет повысить прочность до 12,5; микротвердость до 2,9; абразивную износостойкость до 1,79 раза.

3. Технология полирования абразивными наноматериалами с улучшенными характеристиками. Разработана технология введения наноматериалов в составы на основе ферромагнитного компонента полимерного связующего и абразивного компонента, которая служит для обеспечения низкой шероховатости и повышенной интенсивности съема (увеличение в 1,5 раза).

4. Технология восстановления гильз цилиндров термопластическим деформированием на наноструктурном уровне с обеспечением 100 % постремонтного ресурса. Технология является ресурсосберегающей для повышения надежности агрегатов методом легирования рабочих поверхностей деталей наноструктурированными покрытиями.

5. Технология восстановления деталей комбинированным методом с восстановлением 100 % доремонтного ресурса.

При разработке технологии проведены рентгеноструктурное и металлографическое исследование нанокompозитных покрытий на поверхности стали класса 20Х, образованных при электроискровой обработке компактными электродами из стали 65Г и Св08.

6. Технология финишной антифрикционной противозадирной обработки рабочей поверхности цилиндров. Испытания подтверждают, что подобная обработка, при которой

микровпадины заполняются сухой смазкой, увеличивает ресурс двигателя, улучшает экологические показатели, снижает расход масла.

7. Технологический процесс силового хонингования трехслойными алмазными брусками. Технология обеспечивает сохранение точности взаимного расположения наружных и внутренних поверхностей гильз цилиндров.

8. Технология ремонта валов методом поверхностного пластического деформирования в переменном магнитном поле. Технология предназначена для улучшения эксплуатационных характеристик деталей класса «вал» при ремонте техники.

9. Технологии повышения межремонтного ресурса гидрораспределителей и турбокомпрессоров на основе нанотехнологий. Технологии предназначены для полного восстановления ресурса агрегатов после ремонта [2].

Анализ данных ремонтных предприятий показывает, что из-за использования низкого качества топливно-смазочных материалов допустимые и предельные значения износов деталей и зазоров в ресурсных сопряжениях наступают значительно раньше нормативных сроков, при небольшой наработке лесных машин, поэтому появилась острая необходимость в изыскании других, альтернативных традиционному ремонту способов повышения послеремонтного ресурса агрегатов машин.

10. Существенно продлить ресурс дизельных двигателей и других агрегатов тракторов в режиме штатной эксплуатации предположительно можно с помощью специальных наноматериалов – восстановительных антифрикционных и противоизносных добавок к смазочным материалам. В настоящее время в России и за рубежом производится около 200 различных видов таких препаратов.

Необходимо отметить, что наноприсадки к маслам отличаются от многих других присадок тем, что они, прежде всего, «работают» на металл, улучшая эксплуатационные свойства рабочих поверхностей деталей, причем, эти препараты не реагируют с маслами и не ухудшают их качество. Производители работают над проблемой создания новых присадок на основе применения наноматериалов

для создания устойчивых дисперсий наноразмерных частиц в моторных и трансмиссионных маслах [3].

В этой области проводимых исследований можно выделить следующие направления.

1. Технология частичного безразборного восстановления микроизносов деталей машин. Служит для частичного безразборного восстановления микроизносов подшипников качения, скольжения и других смазываемых поверхностей и предусматривает применение металлолакирующей пластичной смазки «Nano Red Wey» (NRW).

2. Технология восстановления нано- и микродефектов поверхностей трения и их работоспособности. Технология предусматривает применение металлолакирующей наноприсадки к смазочным материалам «Ретурн Металл», которая является современной нано-технической разработкой в области самоорганизующихся наноструктур.

3. Технологии применения нанокристаллических порошков оксидов алюминия в керамических, полимерных и лакокрасочных материалах, а также в качестве износостойких покрытий для восстановления и ремонта деталей. Обеспечивает улучшение свойств материалов и повышенный ресурс эксплуатации.

4. Технология применения нанопрепарата «СУПРОТЕК» для продления ресурса ТНВД без разборки в процессе штатной эксплуатации трактора. Повышает рабочие характеристики топливного насоса при использовании наноматериалов-ревитализантов RVS (PBC), ХАДО. «СУПРОТЕК», компенсирует увеличивающиеся зазоры в результате износа, то есть восстанавливает плотность (герметичность плунжерных пар). Это технология для эксплуатации любых машин и механизмов. Она позволяет отказаться от тяжелого и дорогостоящего ремонта и проводить простую профилактическую обработку механизмов в течение всего срока их службы.

5. Металлополимерная композиция на основе метакрилового анаэробного герметика с добавлением наноразмерных порошков металлов. Смазочные композиции представляют собой устойчивые суспензии наноразмерных порошков (НР) в различных смазочных

**Нанопрепараты добавки к смазочным материалам**

Класс нанопрепаратов	Модификаторы трения	Реметализанты	Кондиционеры	Ревитализанты
Распространенные марки и основные характеристики препаратов	Форум, Аспект, Ум х-2 и др.	Римет, Ресурс, Супермет и др.	Феном, RENOM, ER. ENERGY RELEASE, WAGNER ECO-Universal и др.	RVS (PBC), ХАДО, ФОР-САН, СУПРОТЕК, НИОД, ОМКА, РЕАГЕНТ-2000, WAGNER Micro-Ceramic Oil и др.
Основное назначение	снижение коэффициента трения в 3–4 раза и сил трения в ресурсных сопряжениях	снижение коэффициента трения в 1,5–2 раза; частичное восстановление размеров деталей ресурсных сопряжений	снижение трения в 5–7 раз; защита от задиrow и преждевременного износа ресурсных сопряжений	снижение трения в 3–5 раз; восстановление геометрии деталей в зоне износа, компенсация задиrow в паре трения деталей ресурсных сопряжений
Границы применения по величине износа	до 30 %	до 40–50 %	до 40 %	до 70 %
Механизм действия	образование антифрикционных и противоизносных пленок на поверхностях деталей трибосопряжениях (сервоитные пленки и другие виды модифицирования поверхностей трибосопряжений)			образование защитного слоя металлокерамики (МКЗС) на молекулярном уровне с поверхностью детали; слой до 0,1–0,2 мм обладает высокой твердостью и износостойкостью
Влияние на изменение физико-химических свойств ТСМ	возможно (минус)	возможно (минус)	отсутствует (плюс)	отсутствует (плюс)

средах для повышения физико-механических свойств материалов [4].

Наиболее распространенные нанопрепараты добавки к смазочным материалам представлены в таблице [3].

Ремонтно-восстановительные препараты для ГСМ на основе нанотехнологий применяются в основном для повышения эксплуатационных и экологических качеств бензина и дизельного топлива, а также для профилактической очистки систем подачи топлива (карбюраторов, инжекторов, форсунок, топливопровода), впускных клапанов двигателей, систем выпуска отработавших газов (каталитических нейтрализаторов).

Применение ремонтно-восстановительных препаратов определяется техническим состоянием машин. При этом необходимость того или иного воздействия назначается на основании результатов технической диагностики. Эффективность применения нанотехнологий и наноматериалов доказана

на практике многими учеными, в результате происходит уменьшение дымности дизелей на 20–40 %, повышение мощности двигателя на 15 %, сокращение расхода топлива на 35 %, повышение ресурса на 200–300 %, сокращение межремонтного ресурса дизеля в 2 раза, и это не предел.

**Библиографический список**

1. Балабанов, В.И. Нанотехнологии будущего / В.И. Балабанов. – М.: ЭКСМО, 2009. – 256 с.
2. Разработка стратегии формирования в сельском хозяйстве инженерно-технических услуг для сельхозтоваропроизводителей: науч. отчет под рук. акад. РАСХН В.И. Черноиванова. – М., 2009. – 294 с.
3. Ольховацкий, А.К. Наноматериалы в техническом сервисе сельскохозяйственных машин : учеб. пособие под ред. акад. РАСХН В.И. Черноиванова / А.К. Ольховацкий, В.П. Лялякин, Р.Ю. Соловьев – М.: ГОСНИТИ, 2010. – 67 с.
4. Ерохин, М.Н. Нанотехнологии и наноматериалы в агроинженерии : учеб. пособие под ред. акад. Россельхозакадемии М.Н. Ерохина / М.Н. Ерохин, В.И. Балабанов и др. – М.: МГАУ, 2008. – 300 с.

## ВЛИЯНИЕ СКИН-ЭФФЕКТА НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ТОКА ВНУТРИ СУБМИКРОННОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПРОВОЛОКИ

Э.В. ЗАВИТАЕВ, проф. каф. физики МГУЛ, д-р физ.-мат. наук,

О.В. РУСАКОВ, ст. преподаватель каф. математики и физики МГОГИ,

А.А. ЮШКАНОВ, проф. каф. теоретической физики МГОУ, д-р физ.-мат. наук

*eduardzavitaev@yandex.ru*

Электрические свойства проводников, характерный линейный размер которых сравним с длиной свободного пробега электронов, существенно отличаются от свойств «массивных» проводников [1, 12].

В работе [2] рассчитана высокочастотная электрическая проводимость тонкой цилиндрической проволоки (отношение ее радиуса к длине много меньше единицы). В работе [3] решена задача о влиянии на электрическую проводимость цилиндрической проволоки продольного магнитного поля. В упомянутых работах применяется подход, основанный на решении кинетического уравнения Больцмана для электронов в металле при произвольном характере их отражения от внутренней поверхности проволоки.

Исследование проявления скин-эффекта в различных условиях до сих пор остается актуальной задачей, что подтверждается широким спектром научных публикаций, например, [4, 13, 14].

В том числе в научной литературе достаточно часто встречается решение классической задачи макроскопической электродинамики о скин-эффекте в цилиндрической проволоке, например [5–7]. Однако такое решение становится некорректным для проволок, характерный линейный размер которых сравним с длиной свободного пробега электронов в них, т.к. в этом случае необходимо учитывать рассеяние электронов не только в объеме металлического объекта, но и на его поверхности.

Заметим, что задачи проводимости тонких металлических проволок становятся особенно актуальными в связи с бурным развитием микроэлектроники, где такие проволоки широко применяются.

В настоящей работе моментным методом рассчитана функция распределения,

описывающая линейный отклик электронов в однородной цилиндрической проволоке на переменное электрическое поле, ориентированное вдоль оси симметрии проволоки. По найденной функции распределения удастся рассчитать зависимость напряженности электрического поля внутри проволоки, плотности тока и полного тока через поперечное сечение проволоки от «скин-параметра» (отношения радиуса проволоки к глубине скин-слоя), от отношения радиуса проволоки к длине свободного пробега электронов и частоты, а также от коэффициента зеркальности металла.

### Постановка задачи

Рассматривается цилиндрическая проволока из немагнитного металла радиуса  $R$  и длины  $L$  (считаем, что  $L \gg R$ ), к концам которой приложено переменное электрическое напряжение частоты  $\omega$ . Принимается, что направление электрического поля совпадает с осью симметрии проволоки.

Однородное периодическое по времени электрическое поле

$$E = E_0 \exp(-i \omega t) \quad (1)$$

действует на электроны проводимости (они рассматриваются как вырожденный ферми-газ) внутри проволоки и вызывает отклонение  $f_1$  их функции распределения  $f$  от равновесной фермиевской  $f_0$

$$f(r, v) = f_0(\varepsilon) + f_1(r, v), \quad \varepsilon = mv^2/2,$$

где  $r$  – радиус – вектор (начало системы координат выбирается на оси симметрии проволоки);

$v$  – скорость электрона;

$m$  – эффективная масса электрона в металле.

Это приводит к возникновению высокочастотного тока плотности

$$j = e \int v f \frac{2d^3(mv)}{h^3} = 2e \left( \frac{m}{h} \right)^3 \int v f_1 d^3v, \quad (2)$$

где  $e$  – заряд электрона;  
 $h$  – постоянная Планка.

В формуле (2) используется стандартная нормировка функции распределения  $f$ , при которой плотность электронных состояний равна  $2/h^3$ . Для равновесной функции  $f_0(\varepsilon)$  далее используется ступенчатая аппроксимация [8]

$$f_0(\varepsilon) = \theta(\varepsilon_F - \varepsilon) = \begin{cases} 1, & 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_F, \\ 0, & \varepsilon_F < \varepsilon, \end{cases}$$

где  $\varepsilon_F = mv_F^2/2$  – энергия Ферми ( $v_F$  – скорость Ферми).

Предполагается, что ферми-поверхность имеет сферическую форму.

Задача сводится к отысканию отклонения  $f_1$  функции распределения электронов от равновесной  $f_0$ , возникающего под действием высокочастотного поля (1). В линейном приближении по электрическому полю, функция  $f_1$  удовлетворяет кинетическому уравнению [8–10]

$$-i\omega f_1 + v \frac{\partial f_1}{\partial r} + e(vE) \frac{\partial f_0}{\partial \varepsilon} = -\frac{f_1}{\tau}, \quad (3)$$

где предполагается стационарная зависимость от времени ( $f_1 \sim \exp(-i\omega t)$ ), а интеграл столкновений взят в приближении времени релаксации электронов  $\tau$ .

### Функция распределения

Преобразуем кинетическое уравнение (3) используя функцию

$$f_1(r, v) = g(r, v) \delta(\varepsilon - \varepsilon_r) \exp(-i\omega t), \quad (4)$$

в результате получим новое уравнение

$$-i\omega g + v \frac{\partial g}{\partial r} - e(vE) = -\frac{g}{\tau}.$$

Перейдя в последнем уравнении к цилиндрическим координатам [11], выбрав направление полярной оси  $Z$ , так, чтобы она совпадала с осью симметрии проволоки, имеем

$$-i\omega g + v_r \frac{\partial g}{\partial r} + \frac{v_\varphi}{r} \frac{\partial g}{\partial \varphi} + v_z \frac{\partial g}{\partial z} + \frac{v_\varphi^2}{r} \frac{\partial g}{\partial v_r} - \frac{v_r v_\varphi}{r} \frac{\partial g}{\partial v_\varphi} - ev_z E_z = -\frac{g}{\tau}. \quad (5)$$

Решение уравнения (5) проведем с помощью моментного метода [11], согласно которому функция  $g$  в приближении двух моментов представляется в виде:

$$g = a_1(r)v_z + a_2(r)v_z v_r \quad (6)$$

Найдем соответствующие частные производные от выражения (6) и подставим их в уравнение (5). В результате получим

$$\begin{aligned} & -i\omega(a_1(r)v_z + a_2(r)v_z v_r) + v_r v_z \frac{a_1(r)}{r} + \\ & + v_r^2 v_z \frac{a_2(r)}{r} + \frac{v_r^2 v_z}{r} a_2(r) - ev_z E_0 = \\ & = -\frac{1}{\tau}(a_1(r)v_z + a_2(r)v_z v_r). \end{aligned} \quad (7)$$

Умножая выражение (7) на  $v_z$ , с учетом того, что комплексная частота рассеяния электронов  $\nu = 1/\tau - i\omega$ , имеем

$$\begin{aligned} & \nu(a_1(r)v_z + a_2(r)v_z v_r)v_z + \\ & + v_r v_z^2 \frac{\partial a_1(r)}{\partial r} + v_r^2 v_z^2 \frac{\partial a_2(r)}{\partial r} + \\ & + \frac{v_\varphi^2 v_z^2}{r} a_2(r) - ev_z^2 E_z = 0. \end{aligned}$$

Проинтегрируем полученное равенство по пространству скоростей:

$$\begin{aligned} & (\nu a_1(r) - eE_z) \int v_z^2 d^3v + \\ & + (\nu a_2(r) + \frac{\partial a_1(r)}{\partial r}) \int v_z^2 v_r d^3v + \\ & + \frac{\partial a_2(r)}{\partial r} \int v_r^2 v_z^2 d^3v + \frac{a_2(r)}{r} \int v_\varphi^2 v_z^2 d^3v = 0. \end{aligned}$$

Далее вычислив значения всех четырех интегралов (учитывая связи  $v_r = v_\perp \cos\varphi$ ,  $v_\varphi = v_\perp \sin\varphi$ ,  $v_\perp^2 + v_z^2 = v_F^2$ ) и подставив их в последнее равенство, приходим к уравнению

$$\nu a_1(r) - eE_z + \frac{1}{7} v_F^2 \frac{\partial a_2(r)}{\partial r} + \frac{1}{7} v_F^2 \frac{a_2(r)}{r} = 0. \quad (8)$$

Еще одно уравнение для нахождения моментных коэффициентов  $a_1(r)$  и  $a_2(r)$  найдем, умножив (7) на  $v_z v_r$  и интегрируя по пространству скоростей

$$\frac{\partial a_1(r)}{\partial r} = -\nu a_2(r). \quad (9)$$

Объединим уравнения (8) и (9) в систему, разрешив ее относительно  $a_1(r)$

$$\frac{\partial^2 a_1(r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial a_1(r)}{\partial r} - \frac{7\nu^2}{v_F^2} a_1(r) = -\frac{7\nu e E_z}{v_F^2}.$$

Перейдем в полученном уравнении к новой безразмерной переменной  $\xi = r/R$ , также учтем, что

$$z = \frac{R}{v_f} v = \frac{R}{v_f} \left( \frac{1}{\tau} - i\omega \right) = x - iy,$$

тогда

$$\frac{\partial^2 a_1}{\partial \xi^2} + \frac{1}{\xi} \frac{\partial a_1}{\partial \xi} - 7z^2 a_1 = -\frac{7ze E_z R}{v_F}. \quad (10)$$

Однозначное решение поставленной задачи возможно при выборе граничного условия для неизвестной функции  $f_1(r, v)$  на цилиндрической поверхности металлической проволоки. В качестве такого принимаем условия зеркально-диффузного отражения электронов от поверхности ( $r = R$ ):

$$\int_{v_r < 0} v_z f_1(v_r) d^3 v = q \int_{v_r < 0} v_z f_1(-v_r) d^3 v, \quad (11)$$

где  $v_r$  и  $v_z$  – соответственно компоненты скорости электрона в плоскости, перпендикулярной к оси симметрии проволоки и вдоль оси симметрии проволоки;  $q$  – коэффициент зеркальности (вероятность зеркального отражения):

$$0 \leq q \leq 1.$$

При  $q = 0$  получаем условие диффузного отражения электронов проводимости от внутренней поверхности металлической проволоки, а при  $q = 1$  условие чисто зеркального отражения. При значениях  $q \neq 0$  и  $q \neq 1$  получаем различные варианты смешанного зеркально-диффузного отражения электронов.

Кроме того, для решения поставленной задачи необходимо использовать уравнение для напряженности электрического поля внутри проволоки. Такое уравнение получаем из системы уравнений Максвелла без учета тока смещения, который пренебрежимо мал по сравнению с током проводимости

$$\frac{1}{\xi} \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \xi \frac{\partial E(\xi)}{\partial \xi} \right) = -i \omega \mu_0 R^2 j_z, \quad (12)$$

где оператор Лапласа записан в цилиндрических координатах (индекс  $z$  у напряженности мы опустили).

Для уравнения (12) будем использовать следующее граничное условие

$$E|_{\xi=1} = E_0. \quad (13)$$

Функция (4) позволяет определить плотность тока (2) внутри проволоки. При вычислении интеграла (2) удобно перейти к цилиндрическим координатам, как в пространстве координат, так и в пространстве скоростей. Вектор  $E$  параллелен оси  $Z$ , ось симметрии проволоки совпадает с осью  $Z$ .

Поле (1) в цилиндрических координатах имеет лишь  $z$  – компоненту, соответственно и плотность тока (2) обладает лишь  $z$

– компонентой (линии тока являются прямыми параллельными оси  $Z$ ).

В силу симметрии задачи интегрирование по всему диапазону скоростей  $V_z$  заменяется интегрированием по положительному диапазону и результат удваивается, поэтому, подставляя пределы интегрирования и воспользовавшись свойствами  $\delta$ -функции [2, 3], приходим к выражению

$$j_z = \frac{4 e m^2}{h^3} \exp(-i \omega t) \int_0^{v_F} \int_0^{2\pi+\pi} \int_0^{+\infty} \frac{v_z^2 \delta(v_z - \sqrt{v_f^2 - v_\perp^2})}{\sqrt{v_f^2 - v_\perp^2}} \times \\ \times [a_1(\xi) + a_2(\xi) v_\perp \cos \varphi] v_\perp dv_\perp d\varphi dv_z = \\ = \frac{8 \pi e m^2 v_F^3}{3 h^3} a_1(\xi) \exp(-i \omega t).$$

Окончательно получим

$$j_z = \frac{n e}{m} \exp(-i \omega t) a_1(\xi). \quad (14)$$

Здесь мы учли, что концентрация электронов  $n$  в проволоке определяется по стандартной формуле, согласно которой

$$n = 2 \frac{m^3}{h^3} \int f_0 d^3 v = 2 \frac{m^3}{h^3} \frac{4 \pi v_F^3}{3}.$$

Поэтому уравнение (12) для амплитуды напряженности электрического поля внутри проволоки можно записать в виде

$$\frac{1}{\xi} \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \xi \frac{\partial E(\xi)}{\partial \xi} \right) = -i \omega \mu_0 R^2 \frac{n e}{m} a_1(\xi)$$

или

$$\frac{\partial^2 E}{\partial \xi^2} + \frac{1}{\xi} \frac{\partial E}{\partial \xi} = A a_1(\xi), \quad (15)$$

где

$$A = -i \omega \mu_0 R^2 \frac{n e}{m} = -i \frac{2}{\delta^2} \frac{R^2}{e \tau} = -i \frac{2 \psi^2}{e \tau}.$$

Здесь учтено, что глубина скин-слоя  $\delta$  связана с объемной статической проводимостью металла  $\sigma_0 = n e^2 \tau / m$  соотношением  $1/\delta^2 = 1/2(\sigma_0 \omega \mu_0)$ , а «скин-параметр»  $\psi = R/\delta$ .

Объединим в систему уравнения (10) и (15)

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 a_1}{\partial \xi^2} + \frac{1}{\xi} \frac{\partial a_1}{\partial \xi} - 7z^2 a_1 = -\frac{7zeR}{v_F} E(\xi) \\ \frac{\partial^2 E}{\partial \xi^2} + \frac{1}{\xi} \frac{\partial E}{\partial \xi} = A a_1(\xi). \end{cases}$$

Обозначив константы  $C = 7z^2$  и  $B = -7zeR/v_F$ , получим

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 a_1}{\partial \xi^2} + \frac{1}{\xi} \frac{\partial a_1}{\partial \xi} - C a_1 = B E(\xi) \\ \frac{\partial^2 E}{\partial \xi^2} + \frac{1}{\xi} \frac{\partial E}{\partial \xi} = A a_1(\xi). \end{cases} \quad (16)$$

Будем искать решение системы (16) в виде

$$E = k a_1, (17)$$

где  $k$  – некоторая комплексная величина не зависящая от  $\xi$ .

Тогда система (16) примет следующий вид

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 E}{\partial \xi^2} + \frac{1}{\xi} \frac{\partial E}{\partial \xi} - (Bk + C)E = 0 \\ \frac{\partial^2 E}{\partial \xi^2} + \frac{1}{\xi} \frac{\partial E}{\partial \xi} = \frac{A}{k} E(\xi). \end{cases}$$

Откуда

$$A/k \cdot E(\xi) - (Bk + C)E(\xi) = 0 \Rightarrow A/k = Bk + C, (18)$$

или

$$Bk^2 + Ck - A = 0.$$

Тогда

$$k_{1,2} = \frac{-C \pm \sqrt{C^2 + 4BA}}{2B}. \quad (19)$$

Подставляя (19) в первое уравнение системы (16), получим

$$\frac{\partial^2 E}{\partial \xi^2} + \frac{1}{\xi} \frac{\partial E}{\partial \xi} - \left[ \frac{C}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{C^2 + 4BA} \right] E = 0.$$

или

$$\frac{\partial^2 E}{\partial \xi^2} + \frac{1}{\xi} \frac{\partial E}{\partial \xi} - \chi_{1,2}^2 E = 0, \quad (20)$$

где

$$\chi_{1,2}^2 = \frac{C}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{C^2 + 4BA} = \frac{A}{k_{1,2}}$$

в силу (18).

Решение полученного модифицированного уравнения Бесселя (20) можно представить как

$$E(\xi) = C_1 I_0(\chi_1 \xi) + C_2 I_0(\chi_2 \xi) + C_3 J_0(\chi_1 \xi) + C_4 J_0(\chi_2 \xi),$$

где  $I_0(\chi_1 \xi)$ ,  $I_0(\chi_2 \xi)$  и  $J_0(\chi_1 \xi)$ ,  $J_0(\chi_2 \xi)$  соответственно, модифицированные функции Бесселя 1-го и 2-го рода.

Учитывая то обстоятельство, что при  $\xi = 0$  напряженность электрического поля внутри проволоки  $E(\xi)$  не должна быть расходящейся функцией, константы  $C_3$  и  $C_4$  естест-

венно положить равными нулю. В результате решение (20) примет вид

$$E(\xi) = C_1 I_0(\chi_1 \xi) + C_2 I_0(\chi_2 \xi), \quad (21)$$

где

$$I_0(\chi_1 \xi) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \exp(\xi \chi_1 \cos \alpha) d\alpha, \quad (22)$$

$$I_0(\chi_2 \xi) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \exp(\xi \chi_2 \cos \alpha) d\alpha. \quad (23)$$

Применим граничные условия (11) и (13) для нахождения  $C_1$  и  $C_2$ .

Из (13) и (21) следует, что

$$C_1 I_0(\chi_1) + C_2 I_0(\chi_2) = E_0, \quad (24)$$

где  $I_0(\chi_1)$ ,  $I_0(\chi_2)$  соответственно могут быть найдены из (22) и (23) при  $\xi = 1$ .

Граничное условие (11) позволяет получить выражение, связывающее значения моментных коэффициентов  $a_1(\xi)$  и  $a_2(\xi)$  на границе проволоки. После проведения соответствующих вычислений имеем

$$2/3 \cdot a_1(1)(1 - q) = v_f/4 a_2(1)(1 + q). \quad (25)$$

Выражение для  $a_1(\xi)$  следует из (17) и (21)

$$a_1(\xi) = C_1/k_1 \cdot I_0(\chi_1 \xi) + C_2/k_2 \cdot I_0(\chi_2 \xi). \quad (26)$$

Тогда при  $\xi = 1$

$$a_1(1) = C_1/k_1 \cdot I_0(\chi_1) + C_2/k_2 \cdot I_0(\chi_2). \quad (27)$$

Выражение для  $a_2(\xi)$  можно получить, используя уравнение (9)

$$a_2(\xi) = -\frac{1}{zv_f} \left[ \frac{C_1 \chi_1}{k_1} I_1(\chi_1 \xi) + \frac{C_2 \chi_2}{k_2} I_1(\chi_2 \xi) \right],$$

где

$$I_1(\chi_1 \xi) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \exp(\xi \chi_1 \cos \alpha) \cos \alpha d\alpha, \quad (28)$$

$$I_1(\chi_2 \xi) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \exp(\xi \chi_2 \cos \alpha) \cos \alpha d\alpha. \quad (29)$$

Тогда, при  $\xi = 1$ ,

$$a_2(1) = -\frac{1}{zv_f} \left[ \frac{C_1 \chi_1}{k_1} I_1(\chi_1) + \frac{C_2 \chi_2}{k_2} I_1(\chi_2) \right]. \quad (30)$$

Таким образом (25) принимает следующий вид

$$\frac{2}{3} \left( \frac{C_1}{k_1} I_0(\chi_1) + \frac{C_2}{k_2} I_0(\chi_2) \right) (1 - q) = \frac{v_f}{4} \times \left( -\frac{1}{zv_f} \left[ \frac{C_1 \chi_1}{k_1} I_1(\chi_1) + \frac{C_2 \chi_2}{k_2} I_1(\chi_2) \right] \right) (1 + q). \quad (31)$$

Уравнения (24) и (31) образуют систему, решая которую можно определить  $C_1$  и  $C_2$

$$C_1 = \frac{-\frac{E_0}{I_0(\chi_2)} \left( \frac{2\chi_2^2}{3} (1-q) I_0(\chi_2) + \frac{\chi_2^3}{4z} (1+q) I_1(\chi_2) \right)}{\frac{2\chi_1^2}{3} (1-q) I_0(\chi_1) + \frac{\chi_1^3}{4z} (1+q) I_1(\chi_1) - \frac{I_0(\chi_1)}{I_0(\chi_2)} \left( \frac{2\chi_2^2}{3} (1-q) I_0(\chi_2) + \frac{\chi_2^3}{4z} (1+q) I_1(\chi_2) \right)}, \quad (32)$$

$$C_2 = \frac{\frac{E_0}{I_0(\chi_2)} \left( \frac{2\chi_1^2}{3} (1-q) I_0(\chi_1) + \frac{\chi_1^3}{4z} (1+q) I_1(\chi_1) \right)}{\frac{2\chi_1^2}{3} (1-q) I_0(\chi_1) + \frac{\chi_1^3}{4z} (1+q) I_1(\chi_1) - \frac{I_0(\chi_1)}{I_0(\chi_2)} \left( \frac{2\chi_2^2}{3} (1-q) I_0(\chi_2) + \frac{\chi_2^3}{4z} (1+q) I_1(\chi_2) \right)}. \quad (33)$$

Здесь мы учли, что

$$k_{1,2} = \frac{A}{\chi_{1,2}^2}$$

согласно (18).

### Расчет напряженности и тока

Амплитуду напряженности электрического поля внутри тонкой цилиндрической проволоки, на основании формул (21), (32) и (33) можно представить в виде

$$E(\xi) = E_0 [C_1^* I_0(\chi_1 \xi) + C_2^* I_0(\chi_2 \xi)], \quad (34)$$

где  $C_{1,2}^* = C_{1,2}/E_0$ , а интегралы  $I_0(\chi_1 \xi)$  и  $I_0(\chi_2 \xi)$  определены равенствами (22) и (23).

Когда радиус тонкой проволоки  $R$  значительно превосходит длину свободного пробега  $\Lambda = \tau v_F$  электронов в ней ( $x \gg 1$ , где  $x = R/\Lambda$ ), предельным случаем формулы (34) является результат, совпадающий с результатом работы [7] (классический скин-эффект).

Плотность тока внутри проволоки определяется соотношением (14). Тогда, используя (26), выражение для амплитуды плотности тока в тонкой цилиндрической проволоке можно записать следующим образом

$$j_z = \frac{en}{m} \left[ \frac{C_1}{k_1} I_0(\chi_1 \xi) + \frac{C_2}{k_2} I_0(\chi_2 \xi) \right]. \quad (35)$$

Используя связь между константами  $k_{1,2} = A/\chi_{1,2}^2$ , преобразуем выражение (35) как

$$j_z = \frac{en}{mA} [C_1 \chi_1^2 I_0(\chi_1 \xi) + C_2 \chi_2^2 I_0(\chi_2 \xi)], \quad (36)$$

С учетом того, что

$$A = -i \frac{2\psi^2}{e\tau} = \frac{2\psi^2}{ie\tau},$$

выражение (36) принимает следующий вид

$$j_z = \frac{ne^2\tau}{m} \frac{i}{2\psi^2} [C_1 \chi_1^2 I_0(\chi_1 \xi) + C_2 \chi_2^2 I_0(\chi_2 \xi)]$$

или

$$j_z = \sigma_0 \frac{i}{2\psi^2} [C_1 \chi_1^2 I_0(\chi_1 \xi) + C_2 \chi_2^2 I_0(\chi_2 \xi)]$$

где

$$\sigma_0 = \frac{ne^2\tau}{m}$$

– объемная статическая проводимость металла, а интегралы  $I_0(\chi_1 \xi)$  и  $I_0(\chi_2 \xi)$  определены соответственно равенствами (22) и (23).

Учитывая, что

$$C_{1,2}^* = C_{1,2}/E_0 \text{ и } j_{0z} = \sigma_0 E_0,$$

окончательно получим

$$j_z = j_{0z} \frac{i}{2\psi^2} [C_1^* \chi_1^2 I_0(\chi_1 \xi) + C_2^* \chi_2^2 I_0(\chi_2 \xi)]. \quad (37)$$

В случае отсутствия скин-эффекта ( $\psi = 0$ ) из (37) с помощью предельного перехода имеем

$$j_z = j_{0z} \frac{x}{z} \left[ 1 + \frac{(q-1)I_0(z\sqrt{7}\xi)}{3 \left[ \frac{1}{3}(1-q)I_0(z\sqrt{7}) + \frac{\sqrt{7}}{8}(1+q)I_1(z\sqrt{7}) \right]} \right]. \quad (38)$$

Проинтегрировав выражение (37), определяем полный ток через поперечное сечение тонкой цилиндрической проволоки

$$I = 2\pi R^2 \int_0^1 j_z \xi d\xi =$$

$$= \pi R^2 j_{0z} \frac{i}{\psi^2} [C_1^* \chi_1 I_1(\chi_1) + C_2^* \chi_2 I_0(\chi_2)], \quad (39)$$

где  $I_1(\chi_1)$  и  $I_1(\chi_2)$  определены равенствами (28) и (29) при  $\xi = 1$ .

В случае отсутствия скин-эффекта ( $\psi = 0$ ) из (39) с помощью предельного перехода имеем

$$I = \pi R^2 j_{0z} \frac{x}{z} \left( 1 + \frac{2}{z\sqrt{7}} \times \right. \\ \left. \times \frac{(q-1)I_1(z\sqrt{7})}{3 \left[ \frac{1}{3}(1-q)I_0(z\sqrt{7}) + \frac{\sqrt{7}}{8}(1+q)I_1(z\sqrt{7}) \right]} \right). \quad (40)$$

Асимптотикой формул (37) и (39) в случае больших  $x$  ( $x \gg 1$ , где  $x = R/\Lambda$ ) являются результаты, совпадающие с результатами работы [7] (классический скин-эффект).

Заметим, что при проведении численных расчетов результаты, полученные после применения формул (38) и (40) (случай отсутствия скин-эффекта), совпадают с результатами работы [2], в которой использовался другой математический подход к проблеме.

### Библиографический список

1. Петров, Ю.И. Физика малых частиц / Ю.И. Петров. – М.: Наука, 1984.

2. Завитаев, Э.В. Микроэлектроника / Э.В. Завитаев, А. А. Юшканов. – М., 2008. – 429 с.  
 3. Завитаев, Э.В. ЖЭТФ / Э.В. Завитаев, А. А. Юшканов. – М., 2006. – 887 с.  
 4. Мирошниченко, В.И. Электромагнитные явления / В.И. Мирошниченко, В.Н. Остроушко. – М., 2001. – 324 с.  
 5. Вайнштейн, Л.А. Электромагнитные волны / Л.А. Вайнштейн. – М.: Наука, 1957.  
 6. Смайт, В. Электростатика и электродинамика / В.Смайт. – М.: ИЛ, 1954.  
 7. Ландау, Л.Д. Электродинамика сплошных сред / Л.Д. Ландау, И.М. Лифшиц. – М.: Наука, 1982.  
 8. Харрисон, У. Теория твердого тела / У. Харрисон. – М.: Мир, 1972.  
 9. Займан, Дж. Электроны и фононы / Дж. Займан. – М.: ИЛ, 1962.  
 10. Лифшиц, И.М. Электронная теория металлов / И.М. Лифшиц, М.Я. Азбель, М.И. Каганов. – М.: Наука, 1971.  
 11. Коган, М.Н. Динамика разреженного газа / М.Н. Коган. – М.: Наука, 1967.  
 12. R.V. Dingle. Proc. Roy. Soc. A 201, 545 (1950).  
 13. E.Tuncer, D. P. Neikirk, Electron. Lett. 29, 2127 (1993).  
 14. E.H. Sondheimer, Advances in Physics. 50, 499 (2001).

## АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ФАР

Д.Н. ЛЕСИН, инженер МГУЛ,

Н.И. ЛЕСИН, проф. каф. электроники и микропроцессорной техники МГУЛ, д-р техн. наук

lesin@mgul.ac.ru

В последнее время все большее применение находят методы определения технического состояния антенных систем по результатам измерений поля в ближней зоне [1–3]. Сущность последних сводится к измерению амплитуд и фаз поля в ближней зоне с последующей оценкой интегральных характеристик фазированных антенных решеток (ФАР) в дальней зоне излучения с целью определения их работоспособности. В случае если интегральные характеристики дискретной антенной системы не соответствуют допустимым значениям, она признается отказавшей и возникает проблема ее диагностирования. Известно, что одним из путей решения данной проблемы является решение обратной задачи теории антенных измерений, т.е. по распределению поля в ближней зоне находится распределение поля

на ее раскрытие [1, 2], а по нему – местоположение отказавших излучателей.

Как следует из анализа научно-технической литературы, одним из наиболее эффективных методов решения обратных задач, требующих минимума априорной информации о задаче, является метод, основанный на принципе регуляризации, например по А.Н. Тихонову [4].

Сущность метода состоит в следующем. Поле фазированной антенной решетки в дискретных точках ближней зоны можно представить в виде суммы полей всех ее излучателей

$$E_{nm} = \sum_{n'=1}^{N'} \sum_{m'=1}^{M'} I_{n'm'} h_{nmn'm'} \quad (1)$$

где

$$h_{nmn'm'} = -\frac{1}{2\pi} \frac{\partial}{\partial z_0} \left( \frac{e^{-ikr_{nmn'm'}}}{r_{nmn'm'}} \right);$$

$z_0$  – расстояние от раскрыва ФАР до плоскости измерений;

$r_{nm'n'm'}$  – радиус, связывающий  $n'$  и  $m'$  излучатель ФАР с  $nm$  точкой измерительной поверхности;

$k=2\pi/\lambda$  – волновое число;

$N$  и  $M$  – количество излучателей в строке и столбце ФАР соответственно.

Уравнение (1) можно записать в матричной форме

$$E=H \cdot I + \Delta, \quad (2)$$

где  $E$  – вектор комплексных значений измеренного поля в ближней зоне ФАР;

$H$  – прямоугольная матрица, элементами которой являются  $h_{nm'n'm'}$ ;

$I$  – вектор неизвестных комплексных токов возбуждения излучателей;

$\Delta$  – вектор погрешностей и шумов.

Поскольку при проведении измерений амплитуды и фазы поля в ближней зоне определяются с погрешностью и, кроме того, существует погрешность в определении коэффициентов  $h_{nm'n'm'}$ , следовательно, подобные задачи относятся к классу некорректно поставленных задач [4].

Построение регуляризирующих операторов по принципу А.Н.Тихонова основано на вариационном способе, и идея метода идентификации технического состояния состоит в нахождении регуляризованного решения уравнения (2), а по нему и отказавшие излучатели ФАР. В общем случае регуляризованное решение уравнения (2) можно найти, исходя из оценки степени гладкости решения.

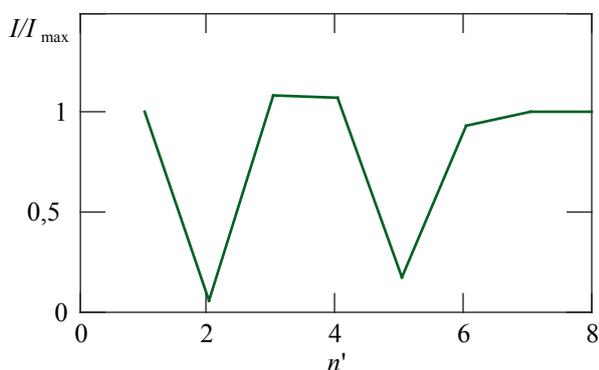


Рисунок. Восстановленные на раскрыве ФАР по результатам измерений поля в ближней зоне значения относительных амплитуд токов излучателей при  $z_0=3\lambda$  и  $\Delta E_{nm} = 5\%$ . Неисправны 2 и 5 излучатели

Оно имеет вид

$$I_{\alpha} = (H^T H + \alpha B)^{-1} H^T E, \quad (3)$$

где  $\alpha$  – параметр регуляризации.

Следует заметить, что различным матрицам  $B$  соответствуют различные стабилизаторы, делающие решение устойчивым. Член  $\alpha B$  служит для подавления сильных осцилляций в решении, возникающих при прямом матричном обращении  $I$  с помощью выражения (2) в реальных условиях, когда элементы матрицы  $E$  известны с погрешностями.

Проверка работоспособности алгоритма проводилась путем численного моделирования на ЭВМ. По заданному амплитудно-фазовому распределению (АФР) токов в раскрыве ФАР производился расчет на ЭВМ поля в ближней зоне для решетки со всеми исправными и некоторыми неисправными элементами. Затем с помощью алгоритма (3) производился расчет АФР тока в раскрыве антенной решетки по полученным значениям поля в ближней зоне сначала без погрешностей, а затем с учетом погрешностей определения левой части уравнения (1) –  $\Delta E_{nm}$ .

На рисунке представлены восстановленные на раскрыве ФАР значения относительных амплитуд токов излучателей  $I/I_{\max}$ , полученные при наличии неисправных элементов в антенной решетке при  $z_0=3\lambda$  и  $\Delta E_{nm} = 5\%$ . Из рис. 1 видно, что совпадение результатов удовлетворительное.

Сравнение полученных результатов определения технического состояния ФАР с результатами, приведенными, например в [2], показывает, что данный алгоритм по достоверности более эффективен, чем рассмотренный в [2].

Таким образом, алгоритм оценки технического состояния ФАР, основанный на принципе регуляризации А.Н. Тихонова, дает устойчивые, надежные решения и позволяет с необходимой точностью определять не только наличие отказавших излучателей в антенной решетке, но и указывать их местоположение в раскрыве.

### Библиографический список

1. Методы измерения характеристик антенн СВЧ / Н.М. Цейтлина. – М.: Радио и связь, 1985. – 368 с.

- Бахрах, Л.Д. Голография и современные методы антенных измерений / Л.Д. Бахрах, А.П. Курочкин. – М.: Сов. Радио, 1979. – 320 с.
- Лесин, Н.И. Оценка технического состояния антенных систем по результатам измерений поля в ближней зоне с учетом методических погрешностей / Н.И. Лесин // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – № 1 (21). – 2002. – С. 129–133.
- Тихонов, А.Н. Методы решения некорректных задач / А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин. – М.: Наука, 1986. – 285 с.

## МОДЕЛЬ ГОМЕОСТАТА НА ПОТОКАХ ЧАСТИЦ СЫПУЧЕЙ СРЕДЫ

В.Л. РЫППО, *ведущий электроник каф. физики МГУЛ*

*caf-physics@mgul.ac.ru*

На сегодняшний день существуют три основных направления в технической кибернетике. Во-первых, это системы автоматического управления, во-вторых, это вычислительная техника и в-третьих – модели гомеостата. Если первые два направления широко известны и хорошо развиты, то информация о моделях гомеостатов значительно меньше. Вероятно, первым ученым, кто обозначил эту тему в качестве научного направления, был У. Росс Эшби [1, 8]. Существует русский перевод первой работы (У. Росс Эшби. Конструкция мозга. Издательство иностранной литературы. Москва, 1962 г.). В нашей стране модели гомеостатов использовали в исследованиях В.Н. Новосельцев Институт проблем управления г. Москва, Ю.М. Горский, В.И. Астафьев, Н.И. Кулиш г. Иркутск, а также Л.И. Бойчук и А.Б. Бахур.

При дальнейшем изложении под гомеостазом понимается процесс поддержания динамического постоянства: параметров, функций, ритмов или направлений развития, обеспечивающих жизнедеятельность и целенаправленность развития простых и сложных объектов, процессов и систем при действии на них внутренних и внешних возмущений.

Тогда под гомеостатом следует понимать физическую или виртуальную модель объекта, процесса, системы, для которых свойственен гомеостаз. В большинстве современных исследований по этому вопросу основное внимание уделяется виртуальным гомеостатам, однако начало этому направлению положил реальный гомеостат Эшби.

Гомеостат Эшби состоит из четырех электромеханических устройств, при этом каждое устройство связано электрической связью с остальными тремя. Гомеостат подобного вида Эшби считал ультрастабильной системой, так как конструкция гомеостата и связи внутри него обеспечивали устойчивость функционирования при внутренних и внешних возмущениях. Схематически гомеостат Эшби представлен на рис. 1. Гомеостат состоит из 4-х блоков с регулирующими электромеханическими устройствами, снабжаемыми энергией, которые воздействуют друг на друга по сложной схеме обратных связей. При внешнем воздействии на любой из блоков, например блок 1 (на схеме это импульс – внешнее воздействие). Блоки 2, 3, 4 будут функционировать таким образом, чтобы помочь блоку 1 парировать это возмущение и вернуть гомеостат в исходное положение (на рис. 1 это совокупность импульсов P2, P3, P4). Аналогичную конструкцию гомеостата построил Эрл И. Клетский в Высшей технической школе в Дельфте (Голландия), несколько изменив электрическую схему.

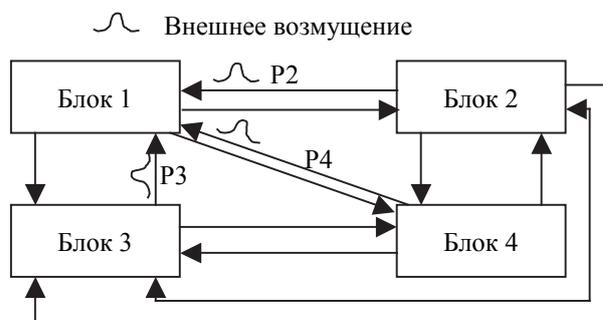


Рис. 1. Гомеостат из 4-х блоков

Эшби считал, что метод исследования с использованием гомеостатических моделей может быть полезен в разрешении социальных и экономических проблем, т.е. при изучении поведения сложных систем и составлении прогнозов для таких систем. В частности, В.Н. Новосельцев использует гомеостатические модели для изучения процессов старения живых организмов.

Для лучшего понимания свойств гомеостатических моделей представим их условную классификацию, предложенную Ю.М. Горским.

Гомеостатическая модель – это модель управления, отражающая с заданной степенью подобия основную структуру и свойства реальных гомеостатов.

Аналоговая модель гомеостата – модель, описываемая дифференциально-интегральными уравнениями.

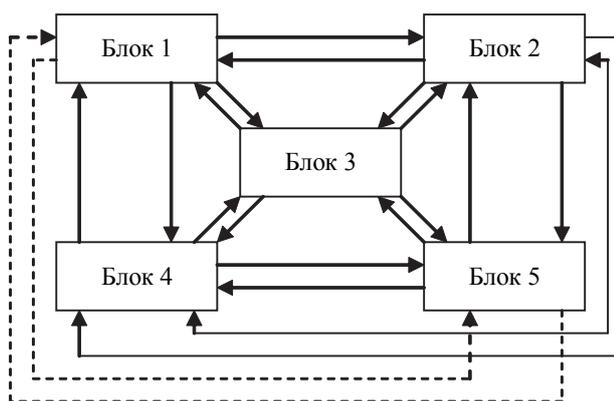


Рис. 2. Гомеостат из 5-х блоков

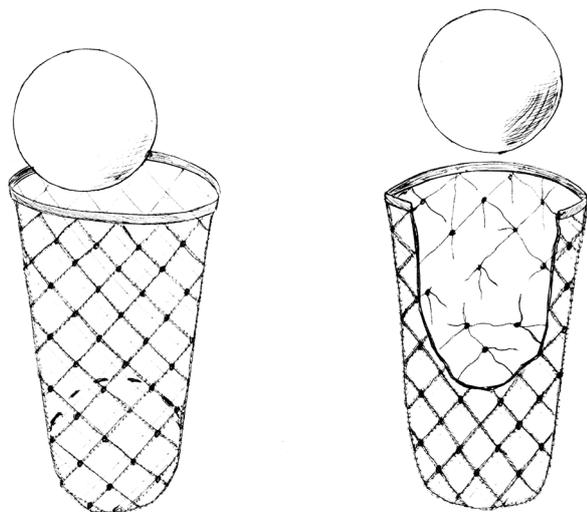


Рис. 3. Планарная сеть (слева) и непланарная сеть (справа)

Цифровая модель гомеостата – модель гомеостата, описываемая в конечных пространствах или реализуемая на элементах цифровой вычислительной техники.

Логическая модель гомеостата – модель гомеостата, описываемая логическими функциями или реализуемая на элементах логики.

Имитационная модель гомеостата – программная модель, реализуемая на ЭВМ, позволяющая проигрывать на ней переходные процессы при заданных ситуациях, связанных с изменением структуры и параметров самого гомеостата, так и созданием внешних возмущений и различных помех.

Однако вернемся к реальным гомеостатам и зададимся вопросом, почему их конструирование в отличие от ЭВМ не получило широкого распространения и какие трудности при подобном конструировании возникают. Для этого обратимся к рис. 2. На этом рисунке представлен схематически гомеостат, состоящий из пяти блоков. Предполагается, что каждый блок гомеостата связан с соседними и управляющие сигналы распространяются в оба направления между каждыми двумя блоками. Отличительной особенностью гомеостата (рис. 2) от гомеостата (рис. 1) является наличие пересекающихся связей (см. пунктирную связь). Добиться устойчивого функционирования такого гомеостата уже более трудная задача. Если количество блоков составит несколько десятков, а расположены они будут не в одной плоскости и в виде последовательно-параллельной схемы, а произвольно в пространстве, структурно подобно непланарному графу, то задача обеспечения устойчивого функционирования становится практически неразрешимой при использовании современной элементной базы систем автоматического управления. Примеры планарной и непланарной сетей представлены на рис.3. Шар свободно помещается внутрь планарной сети, при этом узлы планарной сети проецируются на поверхность шара. Непланарная сеть насыщена внутренними связями и не имеет структурного подобия с планарной сетью. Заметим, что 10 миллиардов нейронов мозга

человека объединены в непланарную сеть и образуют устойчивую систему, другие элементы автоматики, в том числе логические элементы компьютеров, образуют устойчивую систему, только структурно подобную планарной сети.

В природе примеры устойчивых реальных гомеостатов существуют – это человеческий мозг и мозг животных. Каждый нейрон мозга – блок своеобразного гомеостата. Мозг человека содержит порядка 10 млрд нейронов, при этом отдельные нейроны имеют несколько сотен перекрестных связей с соседними нейронами. Трудно представить, что позволяет такой сложной системе устойчиво функционировать. Гомеостазом также обладают сложные физические системы (земная атмосфера, планетарные системы и т.д.) и организационные системы (страны, предприятия, армейские части и соединения и т.д.).

Проведем небольшой анализ литературы по электротехнике, по пневмо- и гидроавтоматике, теории автоматического управления, вычислительной технике. Обращать внимание будем только на принципиальные схемы на блок-схемы, на функциональные схемы, на динамические структурные схемы и на алгоритмы. Из подобного анализа можно сделать вывод, что отдельные элементы на перечисленных схемах соединены последовательно или параллельно.

На рис. 4–5, представлены примеры таких схем, иллюстрирующие соединения отдельных элементов. Схемы систем гидроавтоматики и пневмоавтоматики для экономии места не рассматриваются, хотя и для них последовательное и параллельное соединение также имеет место.

Если создать сеть из элементов автоматики с рабочим телом в виде сыпучей среды, то можно заметить существенные отличия подобной сети от ныне известных. Характерным является тот факт, что на сыпучую среду не распространяется закон о сообщающихся сосудах и равном давлении на стенки сосуда, как в жидкостях и газах, а также закон о выравнивании энергетических потенциалов (в отличие от от пневмо-, гид-

ро, электросетей, где при соединении двух любых точек трубопроводами или соответственно электропроводами, энергетические потенциалы выравниваются). Проиллюстрируем это с помощью рис. 7–10, где изображены фрагменты всех перечисленных сетей, даже не самих сетей, а соединений между отдельными элементами.

На рис. 7 и 8 изображены фрагменты гидро- и пневмосоединений соответственно, где трубопроводы  $\alpha$  и  $\beta$  соединены дополнительным трубопроводом  $\gamma$ .

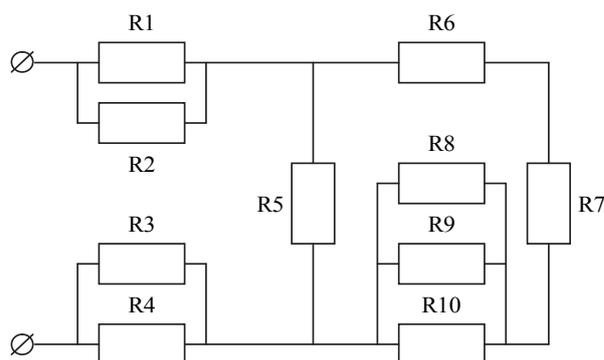


Рис. 4. Принципиальная электрическая схема

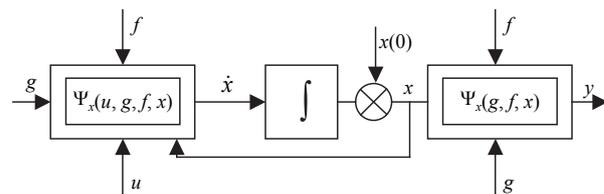


Рис. 5. Структурная схема объекта

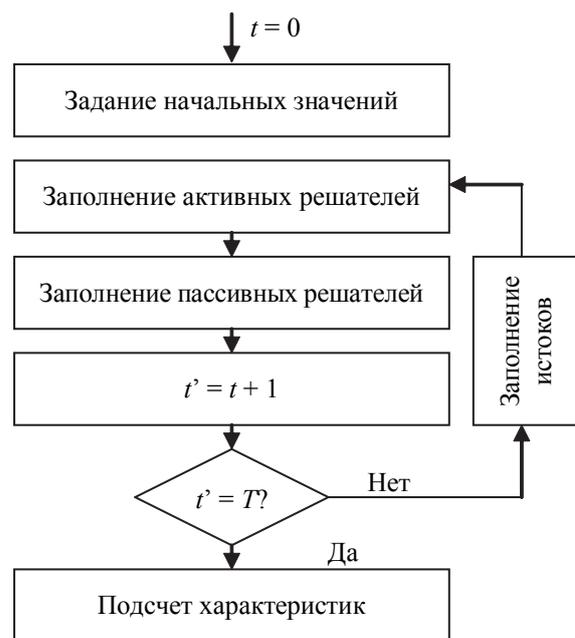


Рис. 6. Алгоритм

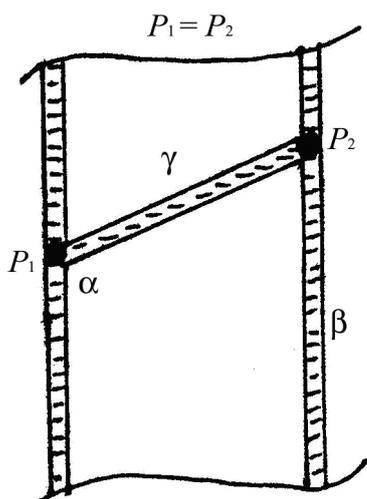


Рис. 7. Фрагмент гидросети

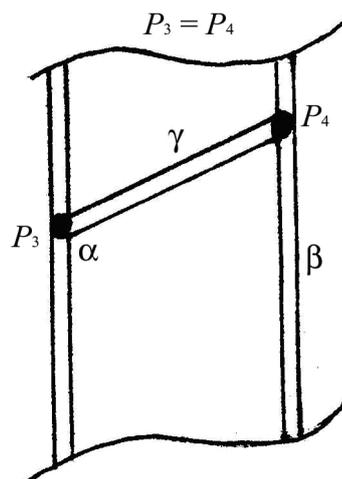


Рис. 8. Фрагмент пневмосети

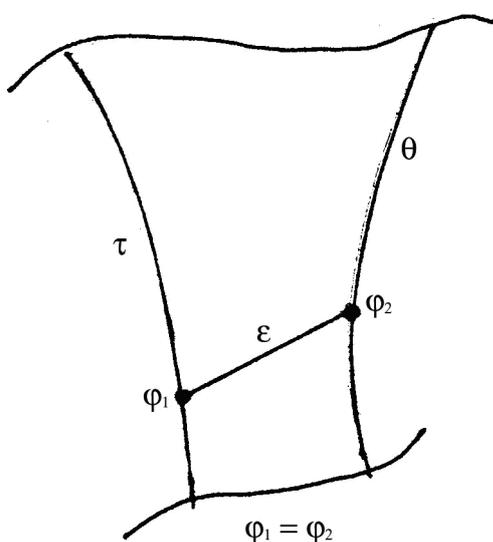


Рис. 9. Фрагмент электросети

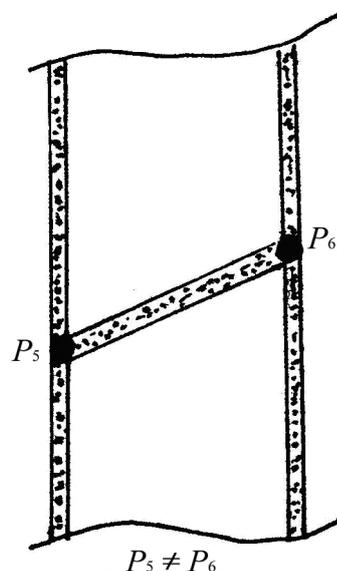


Рис. 10. Фрагмент сети с рабочим телом в виде сыпучей среды

Очевидно, что в этом случае давление  $P_1 = P_2$ , а  $P_3 = P_4$ . На рис. 9 представлен фрагмент соединения двух линий электросети, и можно отметить в соответствии с законами электротехники, что потенциалы  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  в точке соединения линий  $\tau$  и  $\theta$  проводом  $\varepsilon$  равны.

Совсем иначе обстоит дело, если анализировать фрагмент сети, в которой рабочим телом является сыпучая среда. На рис. 10 видно, что два трубопровода такой сети  $\alpha$  и  $\beta$  соединены также как и на рис. 6 и 7 трубопроводом  $\gamma$ . В этом случае, чаще всего, давление в местах соединения двух трубопроводов  $P_5 \neq P_6$  и как исключение давление  $P_5$  может быть равным  $P_6$ .

Принципы построения и функционирования отдельных элементов автоматики, а также логических и дискретно-аналоговых сетей с рабочим телом в виде сыпучей среды подробно рассмотрены в следующих работах [2–7]. В статье «Компьютер на песке» показано, каким образом можно создать логические элементы, составляющие функционально полный набор булевых функций И, ИЛИ, НЕ, представлены дискретно-аналоговые элементы: ПАМЯТЬ и Модель нейрона, для которых рабочим телом является сыпучая среда. Кроме того, показано, каким образом на основе подобных элементов можно строить дискретно-аналоговые сети аналогичные нейросетям. Перечисленные элементы автоматики могут

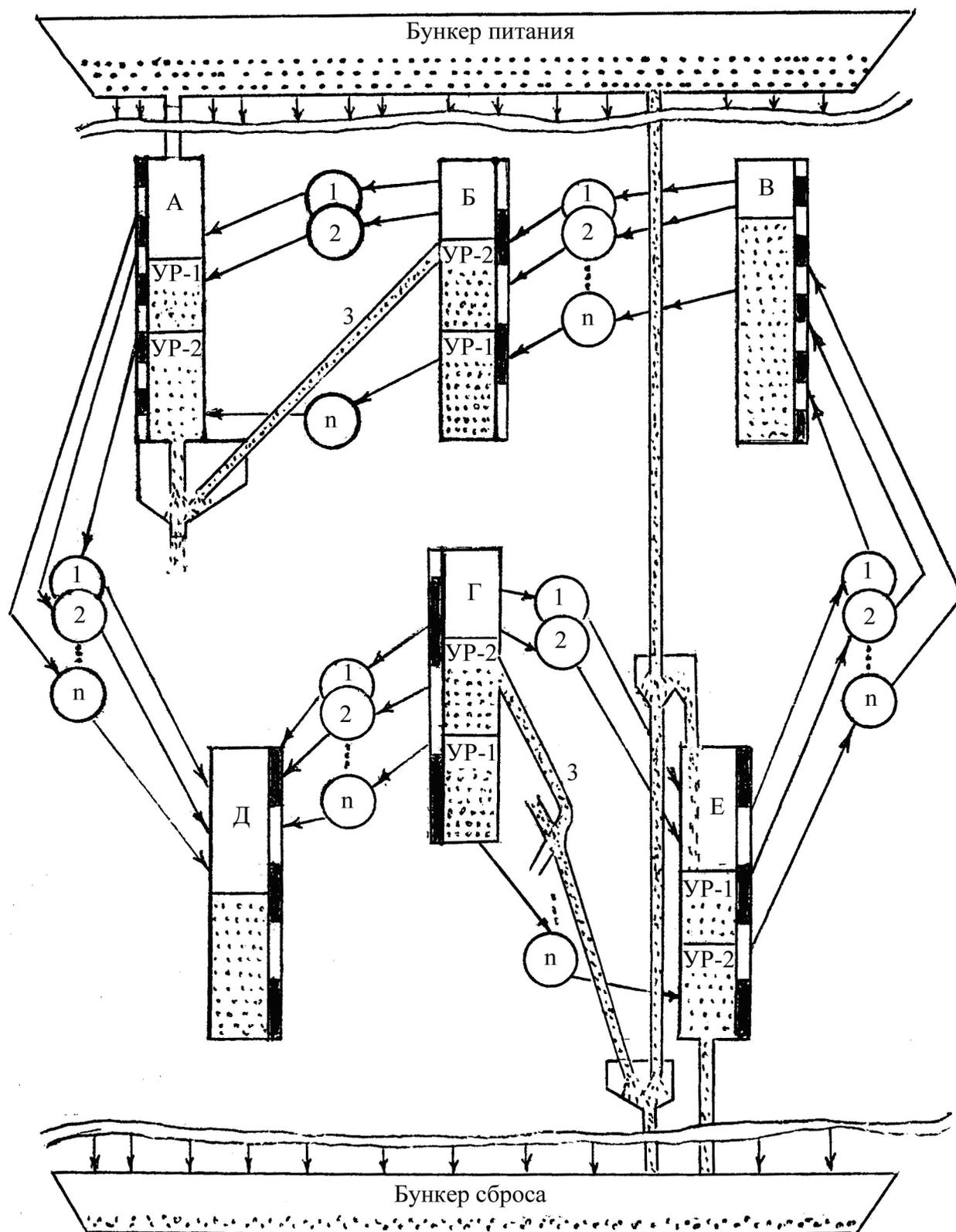


Рис. 11. Гомеостат на потоках сыпучей среды

служить основой для построения реальных гомеостатов, подобных гомеостату Эшби.

На рис. 11 изображен схематически гомеостат на потоках сыпучей среды. Отде-

льные блоки гомеостата обозначены буквами А, Б, В, Г, Д, Е и выполнены в виде элементов ПАМЯТЬ с различными для каждого элемента шкалами для отображения коли-

чественной информации. Известно, что элементы ПАМЯТЬ можно объединять в непланарные сети с помощью двух типов связи. На схеме они обозначены числом 3. Связь между блоками А и Б построена таким образом, что повышение уровня сыпучей среды в блоке Б с отметки Ур-1 до отметки Ур-2 обеспечивает также повышение уровня сыпучей среды в блоке А с отметки Ур-1 до Ур-2. Второй тип связи реализован между блоками Г и Е. В этом случае повышение уровня сыпучей среды в блоке Г с уровня Ур-1 до уровня Ур-2 обеспечит снижение уровня сыпучей среды в блоке Е с уровня Ур-1 до уровня Ур-2. Количество подобных связей между двумя отдельными блоками может составлять несколько десятков при высоте блока в пределах одного метра. Устойчивым будем считать гомеостат, в котором уровни сыпучей среды будут находиться в пределах соответствующих шкал в течение нахождения гомеостата в динамическом состоянии, т.е. когда происходит обмен сигналами в виде порций сыпучей среды между отдельными блоками. Сыпучая среда из бункера питания к блокам гомеостата поступает по множеству каналов, схематически это отображено с помощью стрелок, для того чтобы не переполнять рисунок избыточными линиями. Бункер сброса служит для сбора сыпучей среды, исходящей из каналов сброса. Гомеостаты подобного типа могут состоять из десятков и даже сотен блоков, они способны отображать и перерабатывать количественную информацию и могут оказаться полезными при моделировании сложных систем.

Предположим, имеется план замены динамического поведения гомеостата формальной моделью. Если это все сформулировать проще, то пусть заданы все первоначальные уровни сыпучей среды в каждом блоке гомеостата, состоящего из множества блоков с еще большим множеством связей, объединенных в виде непланарного графа. Гомеостат переводится в динамическое состояние, т.е. начинается обмен сыпучей средой между отдельными блоками сообразно выполненным связям. Необходимо предсказать нахождение уровней сыпучей сре-

ды в каждом блоке через продолжительное время  $T$  при условии, что в известные моменты времени блоки гомеостата получали внешние возмущения (стимулы) в виде одномоментных подач и изъятий порций сыпучей среды по заданной заранее циклограмме. Очевидно, что решение подобной проблемы формальными методами даже с применением вычислительной техники крайне сложная задача, если учитывать, что обмен потоками сыпучей среды между отдельными блоками следует рассматривать как нелинейные и нестационарные процессы.

Существует множество физических и организационных систем, которым свойственно явление гомеостаза. Для примера рассмотрим земную атмосферу и погодные явления в ней. Очень часто по телевидению показывают карты нахождения и перемещения циклонов и антициклонов. Взаимодействие между ними фиксируется и изучается метеорологами, а как следствие этого мы получаем прогноз погоды (температуру, давление, направление и т. д.). Если рассмотреть атмосферные столбы над местами нахождения циклонов и антициклонов на несколько километров вверх и воздушные потоки, которыми они обмениваются на разных высотах, то можно обнаружить структурное подобие между реальным гомеостатом, которым является атмосфера, и гомеостатом на сыпучих средах. Не случайно составление прогноза погоды, как и изучение поведения гомеостата на сыпучих средах, является чрезвычайно сложной задачей, а долговременные прогнозы характеризуются значительными погрешностями. Можно заметить, что увеличение памяти и быстродействия компьютеров не столь значительно влияет на качество прогнозов погоды. А если согласиться с тем, что влияет в лучшую сторону, то можно прийти к выводу, что атмосфера стала менее устойчивой и составление прогноза стало еще более трудной задачей, чем это было ранее.

Следует предположить, что изучение гомеостатов на потоках сыпучей среды и нахождение подобия между ними и реальными сложными системами может оказаться полезным при прогнозировании поведения

подобных систем. Не следует исключать возможности построения реальных искусственных гомеостатов на основе других элементов. Единственно, можно высказать предположение, что ныне известные элементы электро-, пневмо-, гидроавтоматики для этой цели мало пригодны.

Необходимость поиска и использования иных способов моделирования сложных систем обусловлена тем, что не все процессы, объекты, системы можно познать через формальные процедуры (представить в виде алгоритмов, описать через совокупность рекурсивных функций). Интересно будет узнать мнение авторитетных ученых в области искусственного интеллекта по этой проблеме. 1968 г. Дж фон Нейман в работе «Теория самовоспроизводящихся автоматов» (1971) пишет: «...при обсуждении вычислительной машины бессмысленно узнавать, быстрая она или медленная, пока не определен точно тип задач, которые ей придется решать».

Громадная разница – сконструирована ли машина для решения более или менее типичных задач математического анализа, или для теории чисел, или для комбинаторики. Как сконструировать машину для решения типичных задач математического анализа, мы примерно знаем. Но я не уверен, что можно создать машину, хорошо приспособленную для решения задач из теории чисел... Я думаю, что мы слабо представляем себе, как построить хорошую машину для комбинаторики». Позже в 1975 г. Э. Хант в книге «Искусственный интеллект» (1978), обсуждая возможности вычислительных машин, формулирует: «...Эти результаты могут показаться обескураживающими, поскольку они означают, что существует ряд интересных задач, которые нельзя решать алгоритмически, и еще больше таких, для которых недостаточно простых алгоритмов...» В 1988 г. Известный математик Ю. Манин в книге «Вычислимое и невычислимое» отмечает: «...В гносеологическом плане многое можно было бы сказать о соотношении понятий вычислимость и познавательность. Первое из них относится только к проработке избранной математической модели дей-

ствительности, будь то система дифференциальных уравнений или задача выпуклого программирования. Второе же много шире, поскольку сам выбор модели и задача проверки ее на адекватность находятся далеко за пределами алгоритмического мира». Более конкретно и подробно по этому вопросу высказывается известный английский математик и астрофизик Р. Пенроуз в полемической книге «Новый ум короля».

Именно Пенроуз уже в наше время по-новому оценивает возможности современной компьютерной техники и пределов ее применимости, указывает направления поиска технических средств для моделирования сложных систем, не поддающихся алгоритмизации. Пенроуз упоминает об устройствах, работающих на квантовых эффектах, которые могут быть полезны при решении данной задачи, однако, вероятно, в настоящее время подобные устройства еще не созданы. В то же время принцип работы устройств на сыпучих средах разработан и может служить одним из направлений при решении обсуждаемой проблемы.

### Библиографический список

1. Росс Эшби, У. Схема усилителя мыслительных способностей / сб. статей под названием АВТОМАТЫ, под ред. К.Е. Шеннона и Дж. Маккарти / У. Росс Эшби. – М.: Иностранная литература, 1956.
2. Рыппо, В.Л. Способ управления элементами автоматических устройств. Авт. изобрет. 1126729 (СССР), Кл. F 15 C 1 / 00. Заявлено 1 марта 1983 г.
3. Рыппо, В.Л. Логический элемент И / Авт. изобрет. 1126730 (СССР), Кл. F 15 C 1 / 00. Заявлено 1 марта 1983 г.
4. Рыппо, В.Л. Модель нейрона / Авт. изобрет. 1578384 (СССР), Кл. F 15 C 1 / 00. Заявлено 25 августа 1988 г.
5. Рыппо, В.Л. Модель нейронной сети / Авт. изобрет. 1661803 (СССР), Кл. G 06 G 7/60.
6. Рыппо, В.Л. Элементы автоматики на управляемых потоках сыпучей среды / В.Л. Рыппо // тр. Всесоюзного совещания по пневмогидроавтоматике и пневмоприводе. – М., 1990.
7. Рыппо, В.Л. Компьютер на песке // Техника молодежи. – № 7. – 2005.
8. ASHBY W. ROSS, Design for a Brain, London, Chaptman and Hall, New York, John Wiley and Sons, 1952.
9. Пенроуз, Р. Новый ум короля. – М., 2003.

## О ПОДОБИИ СТРУКТУР ЭЛЕМЕНТОВ МАКРО- И МИКРОМИРА

А.П. САВРУХИН, проф. каф. физики МГУЛ, канд. техн. наук

savrukhin@ya.ru

Люди восхищаются гармоничностью движения небесных тел, периодичностью смен времен года, ненарушимой повторяемостью восходов и заходов солнца. Устойчивость планетных систем и галактик, цикличность и спиральность, обусловлена действием множества разнонаправленных факторов, образующих симфонию. Вопрос состоит в том, до какого масштаба простирается такая пропорциональность. В настоящей статье утверждается, что наблюдающаяся гармоническая пропорциональность

имеет исходный образец, которым служат элементарные частицы [1].

Примером динамической симметрии в природе является спиральность. Гете называл спираль «кривой жизни». Винтообразно и спиралевидно расположены рядки семян в корзине подсолнуха (рис. 1), чешуйки шишек, семена в початках и цветки в соцветиях (рис. 2), листья на стебле; спиралевидны раковины моллюсков (рис. 3), усики растений, молекулы наследственности и даже галактики.

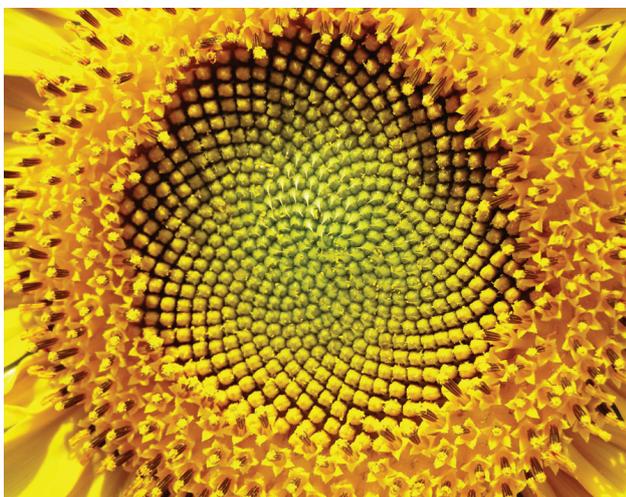


Рис. 1. Корзина подсолнуха (Источник – Яндекс фото. Автор antatil)



Рис. 2. Соцветие Эхмеи (Источник – Яндекс фото. Автор korobeinikoff-anatoly)



Рис. 3. Раковина моллюска Наутилус

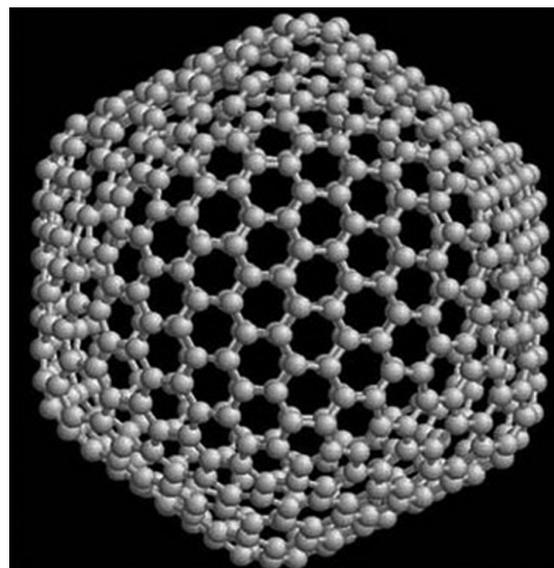


Рис. 4. Фуллерен C540, имеющий форму икосаэдра (<http://www.vestnikcivitas.ru/pbls/1596>)

Принцип гармонической пропорциональности или золотого сечения известен с глубокой древности. Уже при создании пирамиды Хеопса использованы соотношения золотого сечения. Число  $\Phi = 0,5(5^{0,5}-1) = 0,618\dots$  есть предел отношения смежных чисел ряда Фибоначчи и определение гармонического деления отрезка. Ряд построен так, что каждый последующий его член (начиная со второго) равен сумме двух предыдущих: 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 144...

Числом Фидия  $\Phi$  как простой структурной пропорцией в основном определяются многие значения биологических, физических и химических соотношений: структура нуклидов, периодизация групп элементов, химические связи и прочее, а принцип золотого сечения признан высшим проявлением структурного и функционального совершенства целого и его частей в искусстве, науке, технике и природе.

По мере совершенствования научных методов исследования природы ученые продвигаются все глубже в постижении тайн микромира. Найдено, что некоторые молекулы образуют замкнутые цепочки, молекулы ДНК имеют спиральную форму, соотношения элементов в сплавах гармоничны. Известны замкнутые молекулы типа  $C_{60}$ , в которых все атомы углерода находятся на сферической или сфероидальной поверхности, называемые фуллеренами. В этой молекуле, имеющей структуру правильного усеченного икосаэдра, атомы углерода располагаются на сферической поверхности в вершинах 20 правильных шестиугольников и 12 правильных пятиугольников. Они обнаружены даже в породах докембрийского периода. На рис. 4 показан фуллерен, составленный из 540 атомов.

В. Гейзенберг утверждает: «Существующие экспериментальные доказательства довольно основательно свидетельствуют в

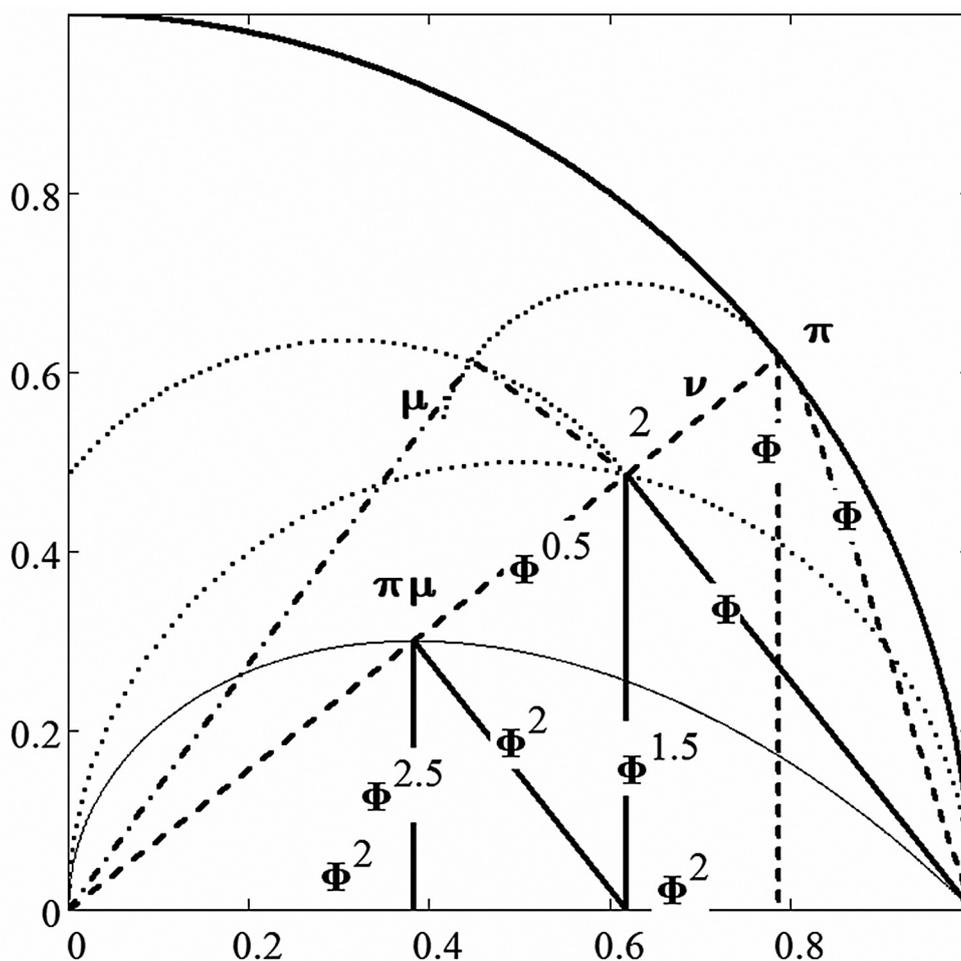


Рис. 5. Схема распада пиона на мюон и нейтрино на энергетической плоскости

пользу идеи, что можно говорить о фундаментальных симметриях. Закон природы, лежащий в основе спектра частиц, их взаимодействий, строения и истории космоса, определяется, вероятно, некоторыми фундаментальными симметриями» [2].

Проявление золотой пропорции в процессах различной природы отражает факт максимальной адаптации системы к внешним условиям развития систем по Принципу порядка при минимальных энергетических затратах и по Принципу наименьшего действия [3]. Энергетика – главное, исходное, ведущий параметр природных объектов [4].

К золотому сечению имеют отношение пяти-, десяти- и шестиугольники. Сторона вписанного десятиугольника равна золотому сечению радиуса описанной окружности, а сам радиус равен стороне вписанного шестиугольника. Экспериментально доказано существование квазикристаллов, обладающих икосаэдрической симметрией, а главной пропорцией икосаэдра является золотая пропорция.

Автор исследовал 756 реакций распадов элементарных частиц на две частицы. Из них в 74.6 % реакций присутствуют признаки золотого сечения. Из данного результата следует, что первоисточником наблюдаемого в природе золотого сечения являются энер-

гетические процессы в микромире. Повсеместно наблюдаемое в явлениях и объектах природы проявление правила золотого сечения есть проекция, следствие процессов, протекающих в микромире. В качестве примера рассмотрим реакцию распада пиона на мюон и нейтрино (рис. 5)

Пион  $\pi$  распадается в точке 2 на мюонное нейтрино  $\nu_\mu$  и мюон  $\mu$  с энергией  $\pi\mu$  [1]. Если энергию покоя пиона принять за единицу (сторона вписанного шестиугольника), то в относительных единицах энергия мюона сразу после распада составит величину  $\Phi^{0.5}$  с относительной погрешностью 0,0007, длина второго катета треугольника 021 равна  $\Phi$  (сторона вписанного десятиугольника), а вертикаль из точки 2 делит горизонталь 01 на отрезки  $\Phi$  и  $\Phi^2$ .

#### Библиографический список

1. Саврухин, А.П. Природа элементарных частиц и золотое сечение / А.П. Саврухин. – М.: МГУЛ, 2004. – 204 с.
2. Гейзенберг, В. Природа элементарных частиц / В. Гейзенберг // Успехи физических наук, 1977. – Т. 121. – № 4. – 658–668 с.
3. Смирнов, А.П. Принцип Порядка / А.П. Смирнов, И.В. Прохорцев. – СПб, 2002.
4. Саврухин, А.П. Истоки природной гармонии. Золотое сечение в макро- и микромире / А.П. Саврухин // LAP Academic Publishing GmbH & Co. 2011 г. – 100 с.

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ЗОНДОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕ

И.И. УСАТОВ, *асп. каф. физики МГУЛ*

*usatov.igor@gmail.com*

**Ф**изические свойства и качество наноструктур, получаемых в плазменных установках различных типов, существенно зависят от параметров плазменного разряда. Измерение таких параметров, а также их контроль на протяжении всего технологического процесса являются чрезвычайно важными задачами плазменных технологий.

В статье приведено описание автоматизированной системы зондовых измерений параметров плазмы, содержащей в том числе атомы и ионы металла для получения нано-

структурных пленок на установках магнетронного разряда с полым катодом [1], а также СВЧ ЭЦР. Система предназначена для измерений в плазменном разряде со следующими характеристиками:

- концентрация электронов и ионов –  $(10^9..10^{12}) \text{ см}^{-3}$ ;
- температура электронов –  $(1..10) \text{ эВ}$ ;
- температура атомов и ионов  $<0,5 \text{ эВ}$ ;
- рабочее давление буферного газа –  $(0,5..10) \text{ мТорр}$ ;
- мощность в разряде – до 15 кВт.

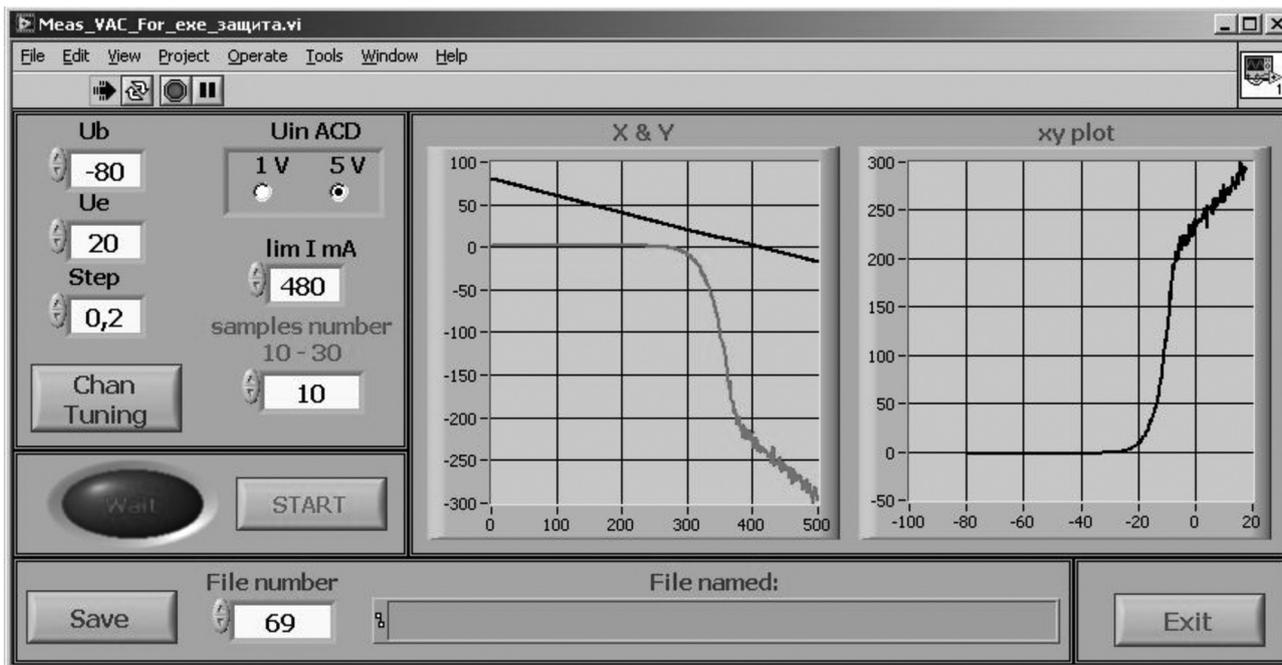


Рис. 1. Интерфейс программы регистрации ВАХ

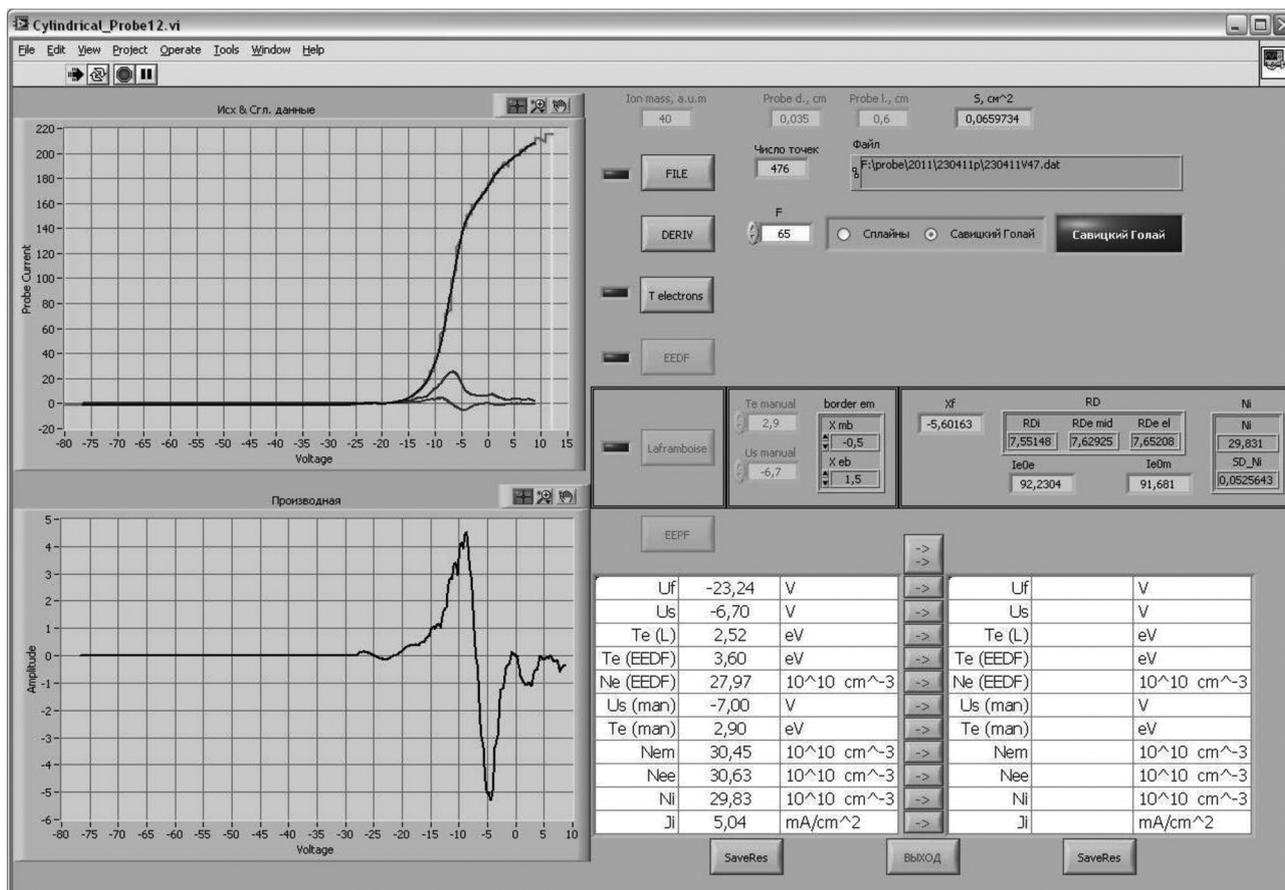


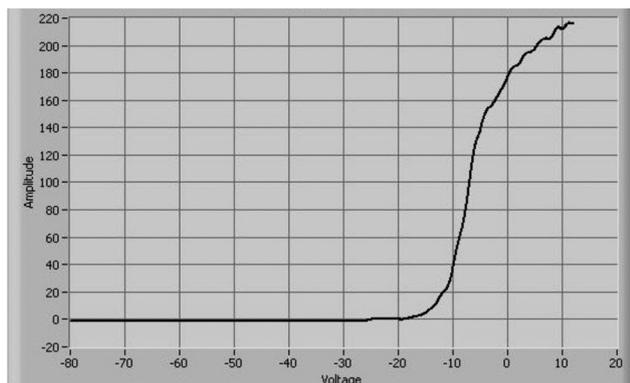
Рис. 2. Интерфейс программы обработки ВАХ цилиндрического зонда

Аппаратная часть системы построена на базе платы сбора данных PCI6221 фирмы National Instruments, блока подготовки

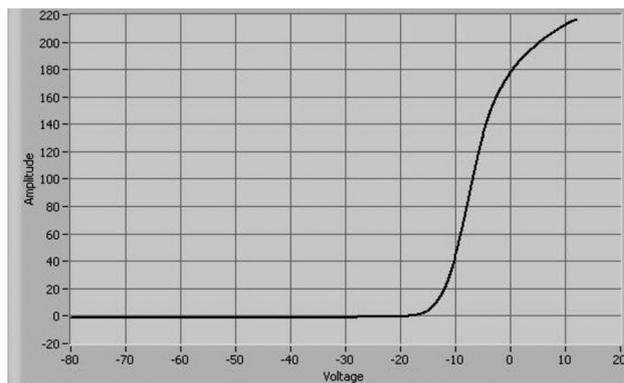
сигналов NI SC-2345 и нескольких специально изготовленных модулей. Все входы и выходы имеют гальваническую развязку,

что повышает помехозащищенность и электробезопасность системы измерений. Программное обеспечение, как для регистрации данных (виртуальные приборы), так и для их обработки, написаны на языке визуального программирования *LabVIEW*. Запуск всех программных модулей и обмен данными между ними производит программная оболочка – сервер виртуальных приборов. Система зондовых измерений состоит из виртуального прибора регистрации вольт-

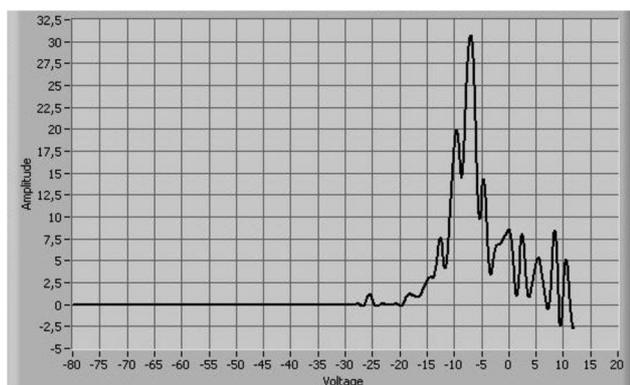
тамперных характеристик (ВАХ) одиночного зонда Лэнгмюра, либо цилиндрического, либо плоского, и трех программных модулей их обработки. Используются два типа зондов: цилиндрический и плоский. Виртуальный прибор генерирует линейно меняющееся напряжение в заданном диапазоне в пределах (-180...+180) В с заданным шагом и синхронно регистрирует напряжение и ток зонда. Аппаратную часть системы составляют: мощный высоковольтный усилитель на



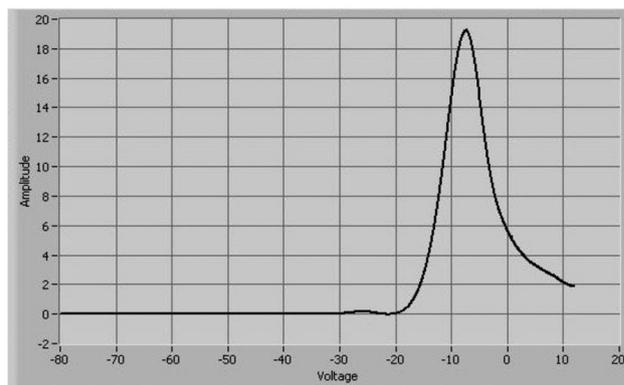
а



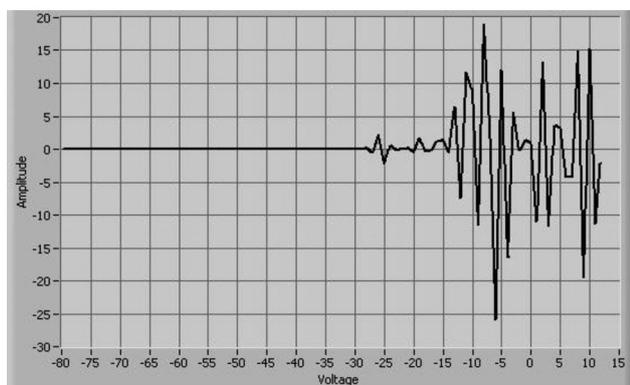
г



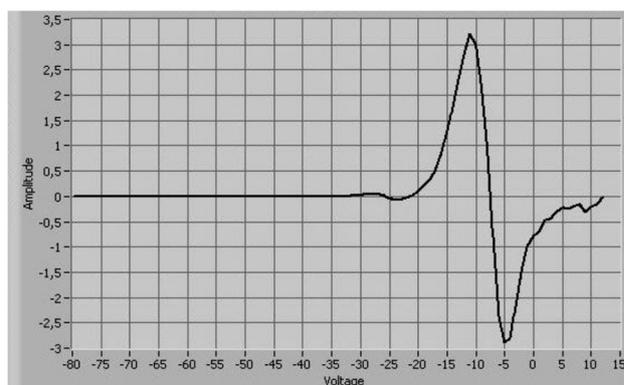
б



д



в



е

Рис. 3. а) негладкая ВАХ; б) первая производная негладкой ВАХ; в) вторая производная негладкой ВАХ; г) гладкая ВАХ; д) первая производная гладкой ВАХ; е) вторая производная гладкой ВАХ

базе операционного усилителя PA92 фирмы APEX microtechnology; блок датчиков тока с электронной коммутацией и собственно плата сбора данных. ВАХ, состоящая из 1600 пар значений напряжение-ток, регистрируется за время менее 4 сек. Малое время регистрации является необходимым условием работы в металлической плазме, где на зонд и другие датчики происходит осаждение пленки металла. Графический интерфейс виртуального прибора (рис. 1) позволяет задавать все параметры регистрации и имеет графическое окно, где отображается измеренная ВАХ.

Непосредственно перед вычислениями параметров плазмы из ВАХ при помощи специального программного модуля производится отбор файлов и отбраковка случайных выбросов на характеристиках. Список отсортированных файлов передается программе обработки (рис. 2). Для каждого типа применяемых зондов используется своя программа обработки.

Обработка ВАХ для цилиндрического зонда предполагает следующую последовательность вычислительных операций.

- Сглаживание данных кубическими сплайнами или методом Савицкого-Голая [3]. Одновременно вычисляются значения сглаженной ВАХ и его первая и вторая производные на регулярной сетке аргументов (интерполяция и дифференцирование со сглаживанием). Необходимость такой процедуры продиктована тем, что экспериментальные данные содержат шумы, обусловленные колебаниями плазмы. Это видно из рис. 3, где слева приведены несглаженные данные, а справа – сглаженные.

- Из сглаженной ВАХ определяется плавающий потенциал  $V_f$ , т.е. потенциал зонда, при котором ток ионов равен току электронов, а общий ток – нулю:  $V_f = V|_{I=0}$ .

- Определяется потенциал плазмы: он равен потенциалу зонда, при котором первая производная тока по напряжению достигает максимума  $V_s = V|_{dI/dV=0}$ .

- Далее определяется температура электронов.

Рассматривается участок  $c-d$  сглажен-

ной ВАХ и ее первой производной (рис.4). Он характеризуется отрицательным потенциалом зонда относительно плазмы

$$V_p = V - V_s \leq 0,$$

где  $V$  – потенциал зонда относительно стенки,

$V_s$  – потенциал плазмы относительно стенки,

$V_p$  – потенциал зонда относительно плазмы.

Ток на зонд – сумма электронного и ионного тока  $I = I_e - I_p$ , причем в соответствии с формулой Ленгмюра

$$I_e = SeN_0 \sqrt{\frac{k_B T_e}{2\pi m_e}} \exp\left(\frac{eV_p}{k_B T_e}\right), \quad (1)$$

где  $S$  – площадь поверхности зонда;

$e, m_e$  – заряд и масса электрона;

$k_B$  – постоянная Больцмана.

На участке  $c-d$  электронный ток изменяется гораздо быстрее, чем ионный:  $\partial I / \partial V_p \ll \partial I_e / \partial V_p$  и можно положить, что  $\partial I / \partial V_p \approx \partial I_e / \partial V_p$ . Тогда, дифференцируя, а затем логарифмируя (1), получим

$$\ln \frac{\partial I}{\partial V_p} \approx const + \frac{eV_p}{k_B T_e}.$$

Таким образом, наклон логарифма первой производной тока по напряжению позволяет определить температуру электронов (рис.4в)

$$T_e = \frac{e}{k_B} \left[ \frac{\Delta(\ln \partial I / \partial V_p)}{\Delta V} \right]^{-1}. \quad (2)$$

Методы определения  $V_f, V_s$  и  $T_e$  базируются на простых моделях зондов (Ленгмюр, Бом и др.).

Следующий программный блок определяет концентрацию плазмы.

Существующие в настоящее время классические аналитические теории электростатических зондов и связанные с ними методы измерений параметров плазмы имеют существенные недостатки, которые необходимо обсудить.

Любое тело, в том числе и зонд, погруженный в квазинейтральную (когда объемная плотность заряда электронов и ионов в среднем равны) плазму, оказывается окруженным слоем пространственного заряда. В объеме этого слоя условие квазинейтральности на-

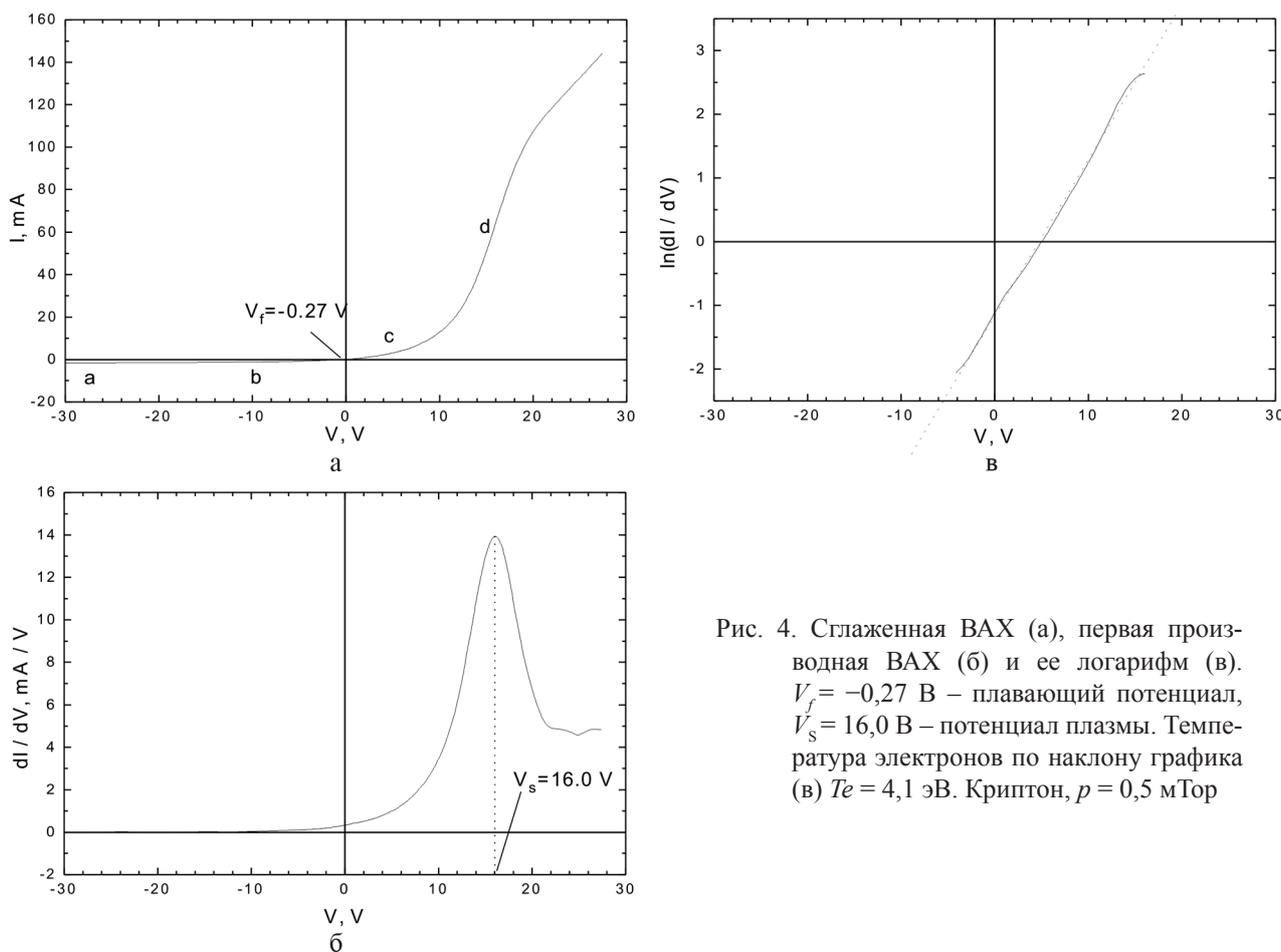


Рис. 4. Сглаженная ВАХ (а), первая производная ВАХ (б) и ее логарифм (в).  $V_f = -0,27$  В – плавающий потенциал,  $V_s = 16,0$  В – потенциал плазмы. Температура электронов по наклону графика (в)  $T_e = 4,1$  эВ. Криптон,  $p = 0,5$  мТор

рушается. Толщина этого слоя и градиент потенциала внутри него зависят от многих факторов, в числе которых потенциал зонда относительно плазмы, температуры электронов и ионов, концентрация частиц. С практической точки зрения анализа ВАХ, наличие такого слоя вокруг зонда означает, что собирающей частицы поверхностью является уже не физическая поверхность зонда, а внешняя поверхность слоя пространственного заряда. Таким образом, в зависимости от потенциала зонда как бы меняется площадь его собирающей поверхности. Толщина слоя по порядку величины равна дебаевской длине

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k_B T_e}{e^2 N_0}} = \sqrt{\frac{\epsilon_0 T_e (\text{эВ})}{e N_0}}, \quad (3)$$

(здесь  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная). Полное аналитическое описание самосогласованного электрического поля пространственного заряда оказывается чрезвычайно сложной задачей, которая вряд ли может быть решена для широкого диапазона параметров плазмы.

Классические аналитические теории либо вообще его не учитывают, считая бесконечно тонким (такова теория Ленгмюра), либо учитывают с массой допущений, не всегда адекватных конкретной физической ситуации (теория Бома и др.) [2].

Существует, однако, другой метод теоретических исследований зондовых характеристик – численное моделирование. Здесь наиболее значительные результаты были получены Лафрамбойзом. Он рассчитал зависимость между нормализованным потенциалом зонда и нормализованным током на зонд  $f(\chi)$ .

$$\chi = \frac{e(V - V_s)}{k_B T_e} = \frac{(V - V_s)}{T_e (\text{эВ})}. \quad (4)$$

Однако пользоваться численными результатами для обработки ВАХ достаточно сложно. В работе Маусбаха [4] произведена параметризация этих численных результатов, а именно, найдено аналитическое приближение нормированного тока на зонд функцией вида

**Коэффициенты для ионной ветви**

$r / \lambda_D$	Электроны $e$				Ионы $i$			
	$a$	$B$	$c$	$\Delta f, \%$	$A$	$b$	$c$	$\Delta f, \%$
0	1,2	0,7	0,48	1,4	1,13	0	0,5	<0,1
1	1,16	0,72	0,45	3,0	1,13	0	0,5	<0,1
2	1,02	1,02	0,45	1,8	1,13	0	0,5	<0,1
3	0,97	1,16	0,42	2,0	1,21	-0,17	0,455	<0,1
4	-	-	-	-	1,258	-0,246	0,385	<0,1
5	0,9	1,45	0,38	2,0	1,223	-0,26	0,353	<0,1
10	0,85	1,88	0,29	1,8	1,158	-0,34	0,258	0,1
20	0,83	2,6	0,21	1,3	1,0943	-0,4046	0,18	0,26
50	-	-	-	-	1,095	-0,861	0,086	0,12
100	-	-	-	-	1,044	-0,948	0,0594	0,14

$$f(\chi) = a(b + \chi)^c, \quad (5)$$

где  $a, b, c$  – параметры, зависящие от рода частиц, отношения радиуса зонда к дебаевской длине  $r/\lambda_D$  и от отношения температур ионов и электронов  $T_i/T_e$  (см. ниже).

Так, нормированный ток ионов и электронов соответственно можно представить в виде

$$f_i(-\chi) = a_i (b_i + \chi)^{c_i}, \quad (6)$$

$$f_e(\chi) = a_e (b_e + \chi)^{c_e}. \quad (7)$$

В плазме, подлежащей измерениям, с достаточной степенью точности выполняется приближение холодных ионов  $T_i/T_e = 0$ . В этом приближении Маусбахом получены численные значения коэффициентов  $a, b, c$ . Если для электронов они обеспечивают достаточную точность аппроксимации, то для ионов точность явно не достаточна. Автором была проделана работа по уточнению коэффициентов для ионной ветви. Результаты сведены в таблицу (для электронов – Маусбах, для ионов – автор).

Ток зонда при отрицательных и положительных нормированных потенциалах соответственно можно представить функциями

$$I = I_{i0} f_i(-\chi) + I_{e0} \exp(\chi), \quad \chi < 0, \quad (8)$$

$$I = I_{e0} f_e(\chi), \quad \chi \geq 0, \quad (9)$$

где

$$I_{e0} = eN_e S \left( \frac{k_B T_e}{2\pi m_e} \right)^{1/2}, \quad (10)$$

$$I_{i0} = eN_i S \left( \frac{k_B T_e}{2\pi m_i} \right)^{1/2}. \quad (11)$$

В программном блоке «Концентрация плазмы» ВАХ зонда приводится к нормированному потенциалу (4) и разделяется на три участка. При этом на участках возрастающем ( $c-d$ ) и электронного насыщения производится нелинейное приближение экспериментальных точек функциями (8–10) методом Левенберга-Марквардта с целью определения коэффициентов  $a, b, c$  и, окончательно, концентрации  $N_e, N_i$ . На участке ионного насыщения ( $a-b$ ) концентрация определяется методом Сони́на (см. ниже).

В следующем программном блоке определяются параметры, связанные с распределениями электронов.

1) Функция распределения электронов по энергиям (EEDF) из второй производной зондового тока на участке ( $a-d$ ) методом Дрювестейна [5]

$$F(\varepsilon) = \frac{4}{S} \sqrt{\frac{m_e}{2e^3}} \sqrt{\varepsilon(\varepsilon B)} \frac{d^2 I}{dV^2}. \quad (12)$$

2) Функция вероятностного распределения электронов по энергиям (EEPF)

$$f_p(\varepsilon) = \frac{F(\varepsilon)}{\sqrt{\varepsilon}}. \quad (13)$$

3) Средняя температура электронов в электронвольтах

$$\langle T_e \rangle = \frac{2}{3} \int_0^\infty \varepsilon f(\varepsilon) d\varepsilon, \quad \text{эВ}. \quad (14)$$

4) Концентрация электронов

$$N_e = \int_0^\infty F(\varepsilon) d\varepsilon. \quad (15)$$

Программа обработки ВАХ плоского зонда отличается от описанной программы (цилиндрического зонда) лишь способом параметризации ВАХ.

В бесстолкновительной плазме с однократными ионами ионный ток насыщения может быть представлен в виде

$$I_i^* = 0.6eN_0S_s\sqrt{eT_e/m_i}, \quad (16)$$

где  $S_s$  – площадь слоя объемного заряда вокруг зонда, которая, в свою очередь, зависит от концентрации заряженных частиц в невозмущенной области плазмы  $N_0$  и температуры электронов  $T_e$  (здесь температура в эВ).

Шеридан в работе [6] на основании численного моделирования показал, что отношение собирающей площади зонда  $S_s$  к его физической площади  $S$  может быть описано уравнением вида

$$S_s/S = 1 + a(-\chi)^b, \quad (17)$$

где  $\chi$  – нормированный потенциал зонда (4);  $a$  и  $b$  – параметры, зависящие от дебаевского радиуса зонда  $r_D = r/\lambda_D$  (а значит, и от концентрации и температуры электронов)

$$a(r_D) = \frac{6.425}{r_D} \left( 1 - \frac{6.835}{r_D} \right),$$

$$b(r_D) = 0.5928 \left( 1 + \frac{2.703}{r_D} \right). \quad (18)$$

Теперь ионный ток насыщения можно выразить формулой

$$I_i^*(\chi) = 0.6eN_0S\sqrt{eT_e/m_i}(1 + a(-\chi)^b). \quad (19)$$

Восстановление концентрации  $N_0$  из предыдущего соотношения на основании измеренных значений ионного тока насыщения является непростой задачей. Дело в том, что параметры нелинейного приближения зависят, как это было сказано выше, от концентрации. Выход из этого положения был найден Сониным [2], правда, для цилиндрических зондов. Автор применил этот метод и для плоского зонда. Можно заметить, что функция от концентрации не зависит

$$\beta(-\chi) = r_D^2 J_i^*(-\chi) = r_D^2 \frac{I_i^*(-\chi)}{0.6eN_0S\sqrt{eT_e/m_i}} = r_D^2(1 + a(-\chi)^b). \quad (20)$$

Подставляя сюда выражение для дебаевской длины, получаем

$$\beta(-\chi) = \frac{r^2}{\epsilon_0 S T_e} \sqrt{\frac{m_i}{e T_e}} I_i^*(-\chi). \quad (21)$$

Здесь  $r$  и  $S$  – уже физические радиус и площадь зонда. Заметим, что величина  $I_i^*(-\chi)$  является измеряемой. Далее поступаем следующим образом. Для одного или нескольких значений нормированного потенциала, при котором током электронов можно пренебречь (скажем,  $\chi \leq -10$ ), строим теоретическую зависимость  $J_i^*(\beta(-\chi) \geq 10)$  в соответствии с (20). Из измеряемых значений ионного тока насыщения при том же потенциале вычисляем экспериментальное значение  $\beta_{ex}$  и интерполяцией предыдущей зависимости находим соответствующее значение  $J_{iex}^*$  и дебаевский радиус зонда

$$r_D = \sqrt{\beta_{ex} / J_{iex}^*}.$$

Окончательно, с учетом (3) определяем концентрацию  $N_0$ . Хотя концентрацию можно вычислить и по одной точке ВАХ, необходимо регистрировать ВАХ в широких пределах, чтобы определить температуру электронов и потенциал плазмы. Модель Шеридана можно считать корректной на основании данных работы [7].

Описанная в статье автоматизированная система зондовых характеристик была отработана, проверена и используется на двух установках высокоплотной плазмы кафедры физики МГУЛ и на плазмодинамическом ускорителе (НВП МГУПИ).

### Библиографический список

1. Царьгородцев Ю.П. Нанесение металлических пленок с использованием магнетронного разряда в системе с полым катодом / Ю.П. Царьгородцев, Н.П. Полуэктов, В.Н. Харченко, И.А. Камышов и др. // Известия вузов. Электроника. – 2009. – № 3. – С. 19–24.
2. Чан П. Электрические зонды в неподвижной и движущейся плазме / П. Чан, Л. Тэлбот, К. Турян. – М.: Мир, 1978 – 204 с.
3. A.Savitzky, M.J.E.Golay / *Analyt. Chem.* 1964, V.36, N8, pp 1627-1639.
4. M. Mausbach / *J. Vac. Sci. Technol.* 15(6), 1997, pp 2923-2929.
5. V.A.Godyak, V.I. Demidov / *J. Phys. D: Appl. Phys.* 44 (2011) 233001 (30pp).
6. T.E. Sheridan / *J. Phys. D: Appl. Phys.* 43 (2010) 105204 (5pp).
7. D. Lee, N. Hershkowitz / *Phys. Plasmas* 14, (2007) 033507 (4pp).

## ПОЛУЧЕНИЕ НАНОСТРУКТУРНЫХ ПЛЕНОК В УСТАНОВКАХ ВЫСОКОПЛОТНОЙ ПЛАЗМЫ

Ю.П. ЦАРЬГОРОДЦЕВ, доц. каф. физики МГУЛ, канд. техн. наук,  
Н.П. ПОЛУЭКТОВ, проф. каф. физики МГУЛ, д-р техн. наук,  
В.Н. ХАРЧЕНКО, проф. каф. физики МГУЛ, д-р техн. наук,  
И.И. УСАТОВ, асп. каф. физики МГУЛ

poluekt@mgul.ac.ru

Среди различных способов получения наноструктурных пленок в нашей статье рассмотрим осаждение пленок в плазме низкого давления методом распыления. В данном методе в результате бомбардировки катода мишени положительными ионами инертного газа происходит выбивание атомов металла (рис.1), которые осаждаются на подложке. В электронной промышленности наиболее широко используется магнетронный тлеющий разряд в скрещенных электрическом и магнитном полях. Плазма в аргоне загорается между анодом и катодом, который изготовлен из распыляемого металла. На катод подается отрицательное напряжение 400–800 В. Электроны захватываются магнитным полем и совершают сложное циклоидальное движение по траекториям вблизи поверхности мишени. Область плазмы с высокой концентрацией (более  $10^{11}$  см<sup>-3</sup>) в виде тора малого объема толщиной порядка 1 см, а вне его – концентрация уменьшается до  $10^9$ – $10^{10}$  см<sup>-3</sup>.

Начиная с 80-х гг. появились так называемые источники высокоплотной плазмы (терминология относится к области плазменных технологий). Эти источники создают плазму с концентрацией более  $10^{11}$  см<sup>-3</sup> в большом (несколько литров) объеме. Получение пленок в таких установках стимулируется большими потоками ионов, что позволяет получать наноструктурные пленки с уникальными физическими свойствами (высокая адгезия, прочность более 40 ГПа, высокая теплопроводность). К таким источникам относится индуктивно связанный разряд, СВЧ-ЭЦР-разряд, геликонный разряд и некоторые другие. Область рабочих давлений таких источников от единиц до десятков мТорр и плазма неравновесная. Температура атомов и ионов порядка 0,1 эВ, а температура элект-

тронов 1–5 эВ. Процесс образования пленок существенно неравновесный.

Особые сложности возникают при осаждении пленок на рельефных субмикронных структурах. В качестве примера можно привести металлизацию сквозных отверстий и канавок (тренчей) при создании СБИС (проводящие шины для управления транзисторами). В обычном магнетроне поток распыленного металла состоит почти на 100 % из нейтральных атомов и ими нельзя управлять. Изотропное распределение частиц здесь приводит к тому, что на верхней части субмикронной структуры образуется навес,

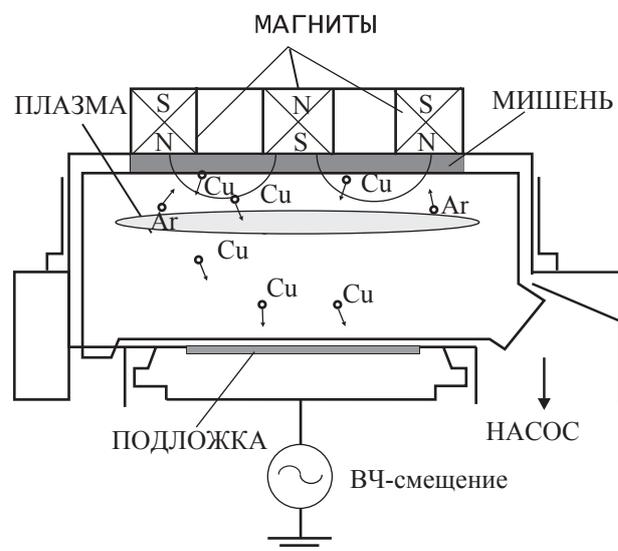


Рис. 1. Схема установки магнетронного разряда

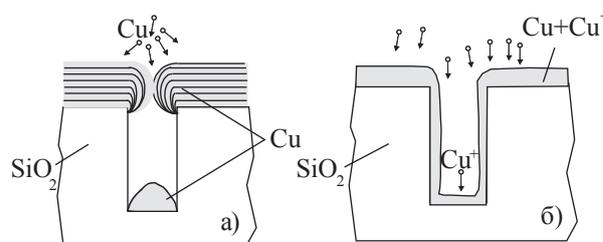


Рис. 2. Получение пленок металла в глубоких субмикронных канавках в магнетронном (а) и магнетронном разряде с полым катодом (б)

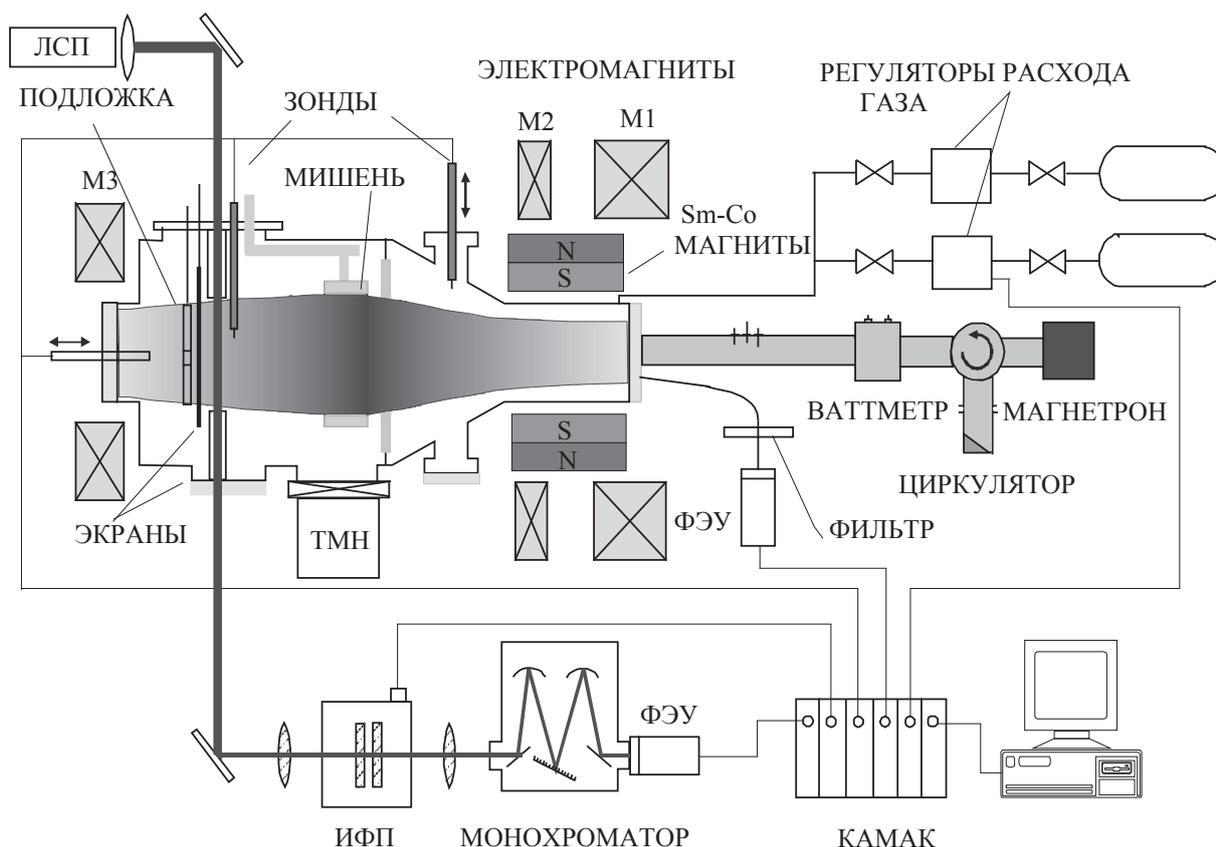


Рис. 3. Схема установки СВЧ-ЭЦР разряда

а внутри – полость (рис.2а). Чтобы провести анизотропную металлизацию узкого отверстия, необходим поток частиц, приходящий на поверхность структуры вдоль нормали. Одним из возможных способов решения данной проблемы является ионизации распыляемого металла. Позитивный эффект состоит в том, что на ионы можно воздействовать электрическим полем слоя перед подложкой (рис. 2б). Для увеличения вероятности ионизации распыленных атомов мишени необходимо создавать плазму высокой концентрации во всем объеме между мишенью и подложкой (15–20 см).

В лаборатории кафедры физики МГУЛ созданы два источника высокоплотной плазмы – на основе СВЧ-ЭЦР разряда и магнетрона с полым катодом.

В СВЧ-ЭЦР источнике плазма образуется в результате поглощения СВЧ волны плазмой, находящейся в магнитном поле, в условиях электронно-циклотронного резонанса, когда ларморовская частота вращения электронов равна частоте падающей волны

2,45 ГГц. Из источника (рис. 3) (диаметр 15 и длина 25 см) плазма вытекает в технологическую камеру (диаметр 35 и длина 55 см), где устанавливается подложка [1].

Эта установка обладает рядом преимуществ. Во-первых, перед подложкой можно устанавливать цилиндрические мишени для распыления, причем несколько из различных металлов, на которые подается отрицательное напряжение. Во-вторых, можно производить предварительную плазменную очистку подложки до начала распыления мишеней. В-третьих, методом распыления можно получать не только металлические, но и диэлектрические пленки, если к аргону добавлять химически активный газ ( $O_2$ ,  $N_2$  и т.п.). Также важно отметить, что пленки можно получать не только распылением, а методом плазмохимического осаждения из газовой фазы (например, водорода с добавками ацетилена или метана для углеродных нанотрубок и т.д.). Кроме того, можно производить травление пленок в химически активных газах (разряды во фтор- и хлорсодержащих газах).

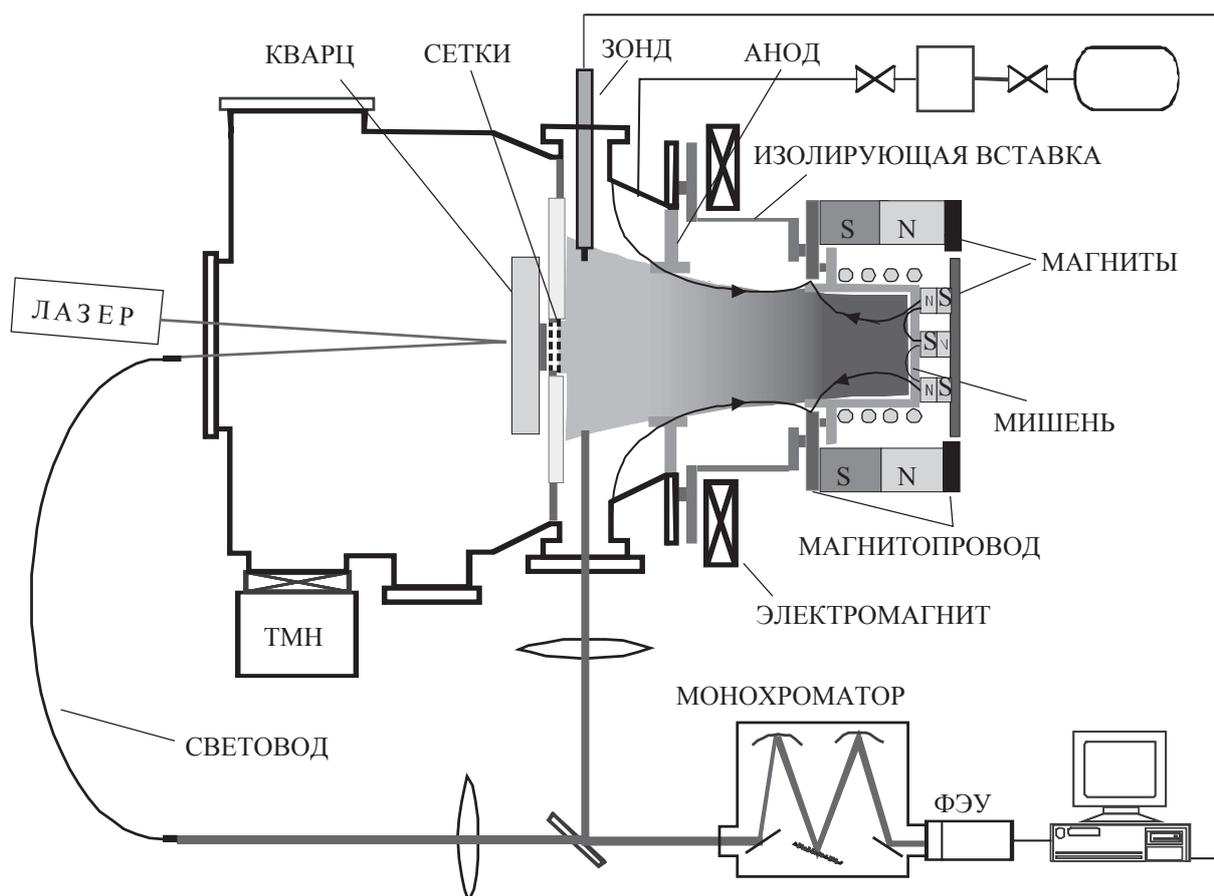


Рис. 4. Схема установки магнетронного разряда с полым катодом

Далее мы рассмотрим более подробно характеристики источника плазмы нового типа – магнетрона с полым катодом. Он предназначен для осаждения пленок с использованием атомов и ионов мишени методом распыления. Особенностью этого разряда является высокая концентрация плазмы (более  $10^{12}$  см<sup>-3</sup> при давлении 1–10 мТор), создаваемая в большом объеме, низкая (10–50 эВ) и легко изменяемая энергия ионов, приходящих на подложку. Такой источник применяется для осаждения адгезионных, диффузионных и затравочных слоев в канавках (трэнчах) и межслойных отверстиях с большим аспектным отношением (глубина/ширина) при производстве современных СБИС [2].

Схема установки магнетронного разряда с полым катодом кафедры физики показана на рис. 4 [3]. Катод магнетрона выполнен в виде закрытого с одного конца цилиндра (диаметр 14 см, длина 10 см), изготовленного из меди и охлаждаемого водой. В него можно вставлять цилиндрические мишени из

различных металлов. Мощность источника разряда – до 12 кВт. Магнитное поле создается 18-ю столбиками магнитов из сплава Fe-Nd-B, расположенных вокруг катода, а также электромагнита, установленного вблизи выходного сечения. Концы столбиков соединены кольцевыми железными магнитопроводами. Индукция магнитного поля вблизи цилиндрической поверхности катода составляет 500 Гс. Магнитная пробка на выходе из катода, образуемая такой конструкцией, удерживает вторичные электроны внутри катода. Скрещенные ЕЧВ поля вызывают дрейф электронов в азимутальном направлении, в результате внутри полого катода создается плазма высокой концентрации (более  $10^{12}$  см<sup>-3</sup>). Коэффициент использования мишени в таком катоде высок, зона эрозии занимает почти всю цилиндрическую поверхность. Те электроны и ионы, которые имеют начальную аксиальную скорость, способны покинуть полый катод и распространяться к подложке. Для данного катода диаметр центрального ядра потока

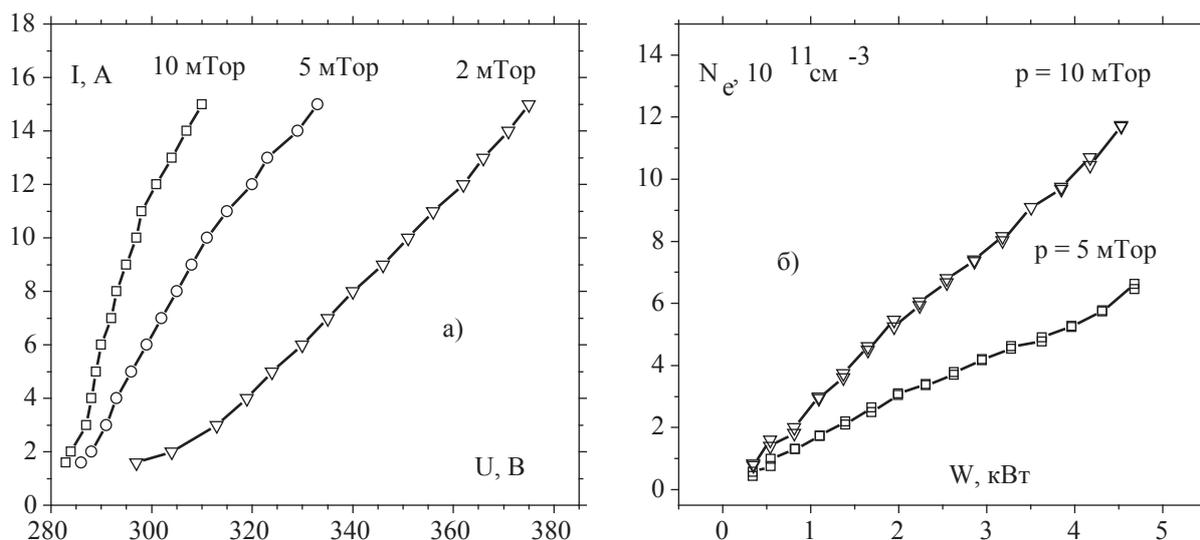


Рис. 5. Вольт-амперные характеристики разряда при разных давлениях (а); зависимость концентрации от мощности разряда на расстоянии 17 см от выходного сечения (б)

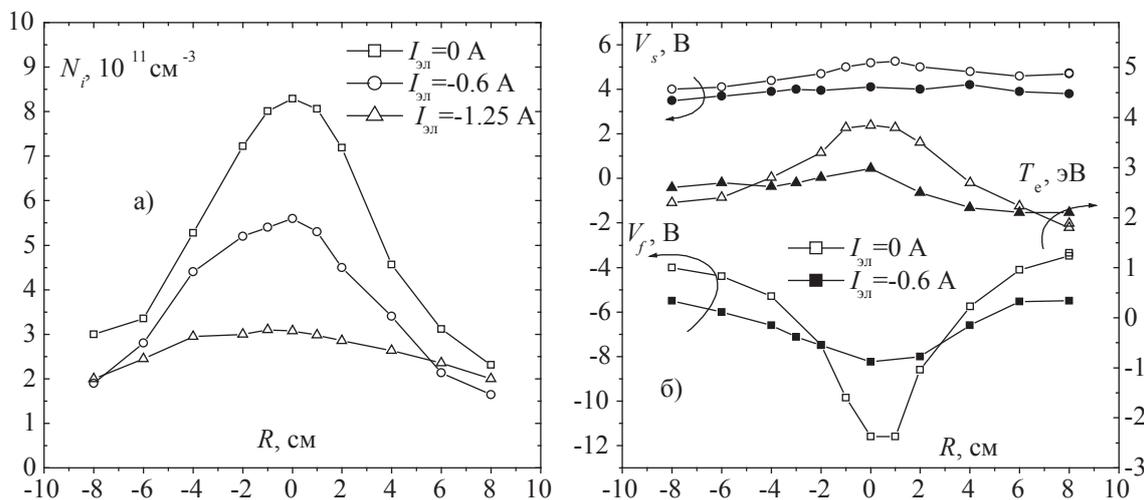


Рис. 6. Радиальные распределения: а) концентрации электронов; б) – потенциала плазмы  $V_s$  (● ○), плавающего потенциала  $V_f$  (■ □) и средней температуры электронов  $\langle T_e \rangle$  (▲ Δ) в зависимости от тока электромагнита  $I_{эл}$ . Ar,  $p=10$  мТор;  $I=6$  А;  $U=290$  В; расстояние от магнетрона 17 см

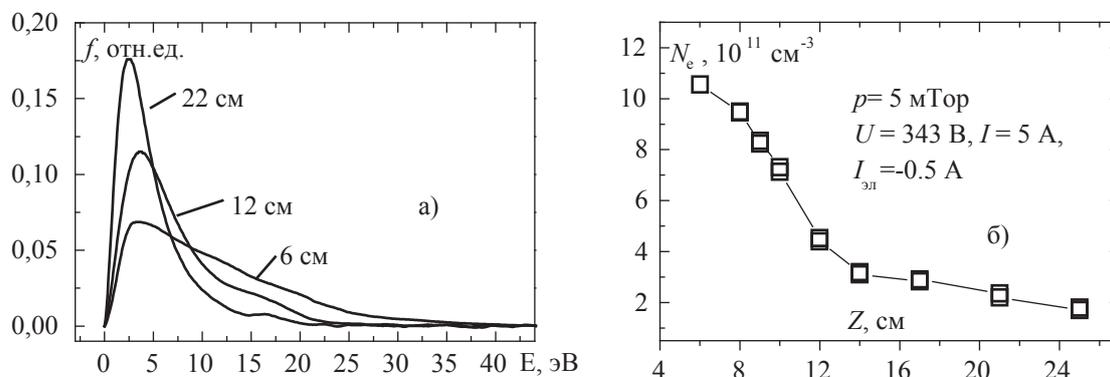


Рис. 7. Функции распределения электронов по энергиям (а) и концентрация плазмы (б) как функция расстояния от среза магнетрона

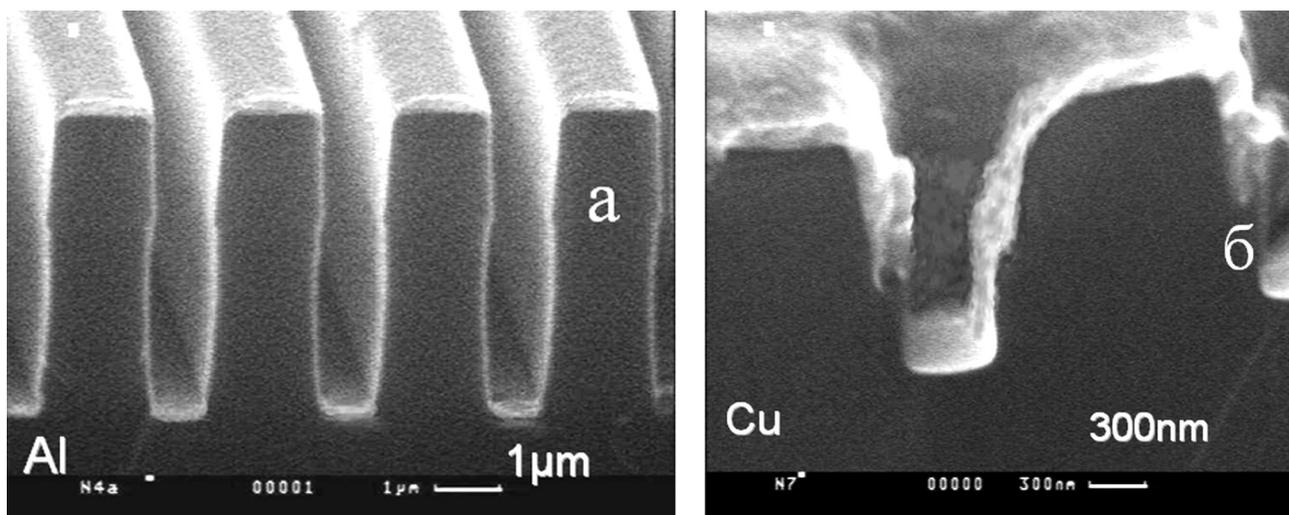


Рис. 8. а) – Металлизация тренча  $5 \times 1$  мкм<sup>2</sup>. 270 нм – верх, 220 нм – дно, 100 нм – стенки ( $p = 10$  мТорр,  $W = 3$  кВт,  $Ar + Al$ ). б) – Металлизация ступенчатого отверстия  $1.5 \times 0.4$  мкм<sup>2</sup> ( $p = 5$  мТорр,  $W = 2,6$  кВт)

составляет порядка 5 см на расстоянии 20 см от выходного сечения магнетрона. Для расширения потока плазмы и создания более однородного радиального распределения на расстоянии нескольких сантиметров от среза и установлен электромагнит, магнитное поле которого включено навстречу магнитному полю постоянных магнитов.

Из источника плазма поступает в технологическую камеру, в которой установлен водоохлаждаемый алюминиевый диск с подложками для нанесения пленок.

Качество получаемых пленок зависит от величины и энергии потока набегающих частиц (ионов, нейтралов, электронов) и температуры подложки. Для определения этих параметров плазмы производились зондовые и спектральные измерения с помощью автоматизированной системы сбора данных на базе аппаратуры фирмы National Instruments и программного обеспечения в среде LabVIEW.

На рис. 5а приведены вольт-амперные характеристики разряда в аргоне для разных давлений с медной мишенью (ток до 16 А, напряжение менее 400 В). Характеристики указывают на высокую проводимость плазмы. На рис. 5б показана зависимость концентрации плазмы на оси разряда и расстоянии 17 см от выходного сечения магнетрона. Из нее видно, что концентрация плазмы растет линейно с мощностью и даже на большом

расстоянии превышает  $10^{11}$  см<sup>-3</sup>. Основной вклад в концентрацию плазмы вносят ионы аргона, а концентрация ионов меди 10–25 %.

Влияние магнитного поля электромагнита на радиальные характеристики плазмы, измеренные на расстоянии 20 см от среза магнетрона, показано на рис.6. Увеличение магнитного поля электромагнита, направленного навстречу магнитному полю постоянных магнитов, с одной стороны, приводит к росту однородности потока, с другой – к падению концентрации плазмы (рис. 6). Следует отметить, что энергия ионов на изолированную подложку, равная  $e(V_p - V_f)$ , порядка 20 эВ. Подавая напряжение смещения (ускоряющее напряжение) на подложку можно вызывать перераспыление получаемых пленок (необходимое для осаждения пленок на рельефные поверхности сложной формы). Такое ускорение ионов также необходимо для получения сверхтвердых покрытий. Скорости осаждения – сотни нм/мин, степень ионизации потока распыленного металла – десятки процентов.

Возрастание концентрации и числа высокоэнергетичных электронов с увеличением мощности разряда вызывает эффективную ионизацию распыленных атомов меди. На рис. 7а представлены функции распределения электронов по энергиям на разных расстояниях от источника. На рис. 7б показано продольное распределение концентрации

плазмы. Видно, что вблизи источника велика доля электронов с энергией более 10–16 эВ, которые способны ионизовать как атомы аргона (15,7 эВ), так и металла (7,5 эВ). С увеличением расстояния доля таких электронов уменьшается, тем не менее, даже на расстоянии 20 см имеет место ионизация.

Спектральные измерения показали, что с увеличением мощности разряда интенсивность излучения атомов аргона и меди возрастает гораздо медленнее, чем интенсивности ионов аргона и меди, что указывает на достижение больших степеней ионизации потоков распыленных атомов, которая для меди достигает 60 %, а для алюминия и титана до 80 %.

На рис. 8 а, б приведены фотографии с электронного микроскопа пленок металла на глубокой канавке и отверстиях.

Профили слоев на различных поверхностях структур указывают на анизотропный

характер заполнения: козырек на верхней части структур отсутствует. По измеренным толщинам пленки на верхней поверхности глубокой канавки (поток атомов и ионов металла) и на ее дне (поток только ионов металла) можно оценить степень ионизации потока. Для алюминия и титана он превышает 70 %, для меди – до 60 %.

### Библиографический список

1. Полуэктов, Н.П. Экспериментальная технологическая установка с СВЧ-ЭЦР плазмой / Н.П. Полуэктов, Ю.П. Царьгородцев // Приборы и техника эксперимента, 1996, № 4. – С. 150–155.
2. Vyas V., Kushner M.J. Scaling of hollow cathode magnetrons for ionized metal physical vapor deposition // J. Vac.Sci.Technol. – 2006. – A24. – P. 1955–1969.
3. Царьгородцев, Ю.П. Магнетронный разряд с полым катодом / Ю.П. Царьгородцев, Н.П. Полуэктов, В.Н. Харченко, И.А. Камышов // Известия вузов. Электроника, 2009. – № 3. – С. 5–10.

## О КОНСТРУКЦИИ ДРОССЕЛИРУЮЩЕ-ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНОГО КЛАПАНА

В.В. ЦЫПЛАКОВ, *проф. каф механизации лесного хозяйства и лесомелиорации СГАУ им. Н.И. Вавилова, д-р с.-х. наук,*  
С.В. ФОКИН, *доц. каф. механизации лесного хозяйства и лесомелиорации СГАУ им. Н.И. Вавилова, канд. техн. наук*

*feht@mail.ru*

Территория Среднего Поволжья относится к степной и лесостепной климатическим зонам. Леса этих зон представлены, в основном, твердолиственными породами (дуб – 52 %, липа – 9 %, сосна – 21 %). Так как в настоящее время в Среднем Поволжье лесокультурные работы осуществляются при расчистке нераскорчеванных вырубок с использованием узкополосной расчистки (2,5–6,0 м) от порубочных остатков и пней [1–3], то при этом возникает проблема измельчения пней, так как исследования форм поверхности торцевого среза пней показали, что в Среднем Поволжье наиболее распространены пни со сложной формой торцевой поверхности пней.

В связи с данным фактом процесс торцевого фрезерования пней, имеющих слож-

ную поверхность среза, можно разделить на 2 этапа: начальный – неустановившийся режим резания, основной – установившийся режим резания. Начальный этап непродолжителен по времени. Однако вследствие кратковременной неравномерной загрузки рабочего органа и отсутствия жестких наложенных связей возможно отклонение оси вращения конструкции от нормали, что может сказаться на работоспособности оборудования [4].

Поэтому в целях совершенствования технологических схем расчистки вырубок от пней в степной и лесостепной зонах Среднего Поволжья предлагается машина для измельчения пней, оснащенная конической фрезой с жидкостным наполнителем (КФЖН), имеющей в конструкции центрирующее перьевое

сверло и крестовидную муфту для присоединения к механическому приводу (рис. 1) [5, 6]. Предлагаемый рабочий орган способен измельчать пни со сложной формой торцевого среза.

Для измельчения пней КФЖН можно применять следующие технологические приемы:

1 Технологический прием (применяемый)– за счет привода, обеспечивается равномерная угловая скорость вращения фрезы  $\omega = \omega_0 = \text{const}$  и за счет предохранительно-дресселирующего клапана, входящего в состав гидравлической системы лесохозяйственной машины [7] обеспечивается равномерная скорость подачи  $v = v_0 = \text{const}$ . Для обеспечения необходимой величины подачи конической фрезы машина для измельчения пней обеспечена гидравлической системой.

2 Технологический прием (рекомендуемый)– за счет использования силы тяжести фрезы и жидкости в ее корпусе. При таком технологическом приеме обеспечивается равномерная угловая скорость вращения рабочего органа  $\omega = \omega_0 = \text{const}$ , существенно изменяя роль привода вертикальной подачи фрезы.

Привод подачи помогает центрировать фрезу и компенсировать действующие силы резания и силы тяжести. При этом представляется возможным в процессе резания варьировать подачей фрезы  $\Pi = v(t)/\omega_0$  и за счет изменения компенсирующей силы привода фрезы влиять на сталкивающие силы, образующиеся на режущих кромках рабочего органа, вследствие их неравномерной загрузки.

Реализация такого технологического приема в настоящее время невозможна вследствие того, что существующие гидросистемы лесохозяйственных машин не позволяют осуществлять регулируемую принудительную подачу рабочих органов агрегатных машин с небольшой их скоростью и обеспечивать необходимую компенсирующую силу привода путем плавной подачи конической фрезы при измельчении пня и быстрому переводу рабочего органа в транспортное положение. В

настоящее время лесохозяйственные машины имеют одинаковую скорость подъема и опускания рабочих органов.

Для реализации данного положения предлагается усовершенствованная гидравлическая система лесохозяйственных машин (рис. 2), включающая: насос 1, напорную 3 и вспомогательную 4 магистрали, гидрораспределитель 2, силовой гидроцилиндр 5, гидрозамок 6, состоящий из корпуса 11 с установленным в нем обратным подпружиненным клапаном 7, дросселирующе-предохранительный клапан 8 (рис. 3) [1], состоящий из корпуса 19, входной 12 и выходной 13 полос-



Рис. 1. Общий вид машины, оснащенной конической фрезой с жидкостным наполнителем

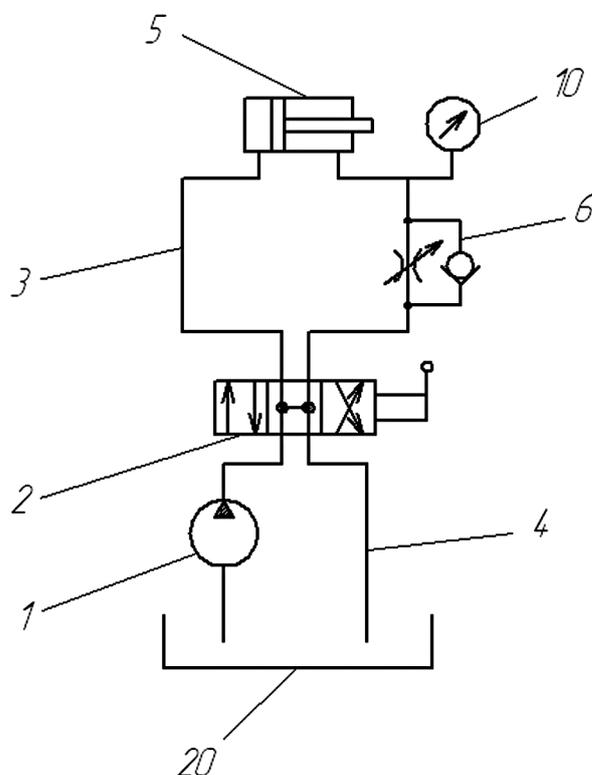


Рис. 2. Схема гидравлической системы лесохозяйственных машин

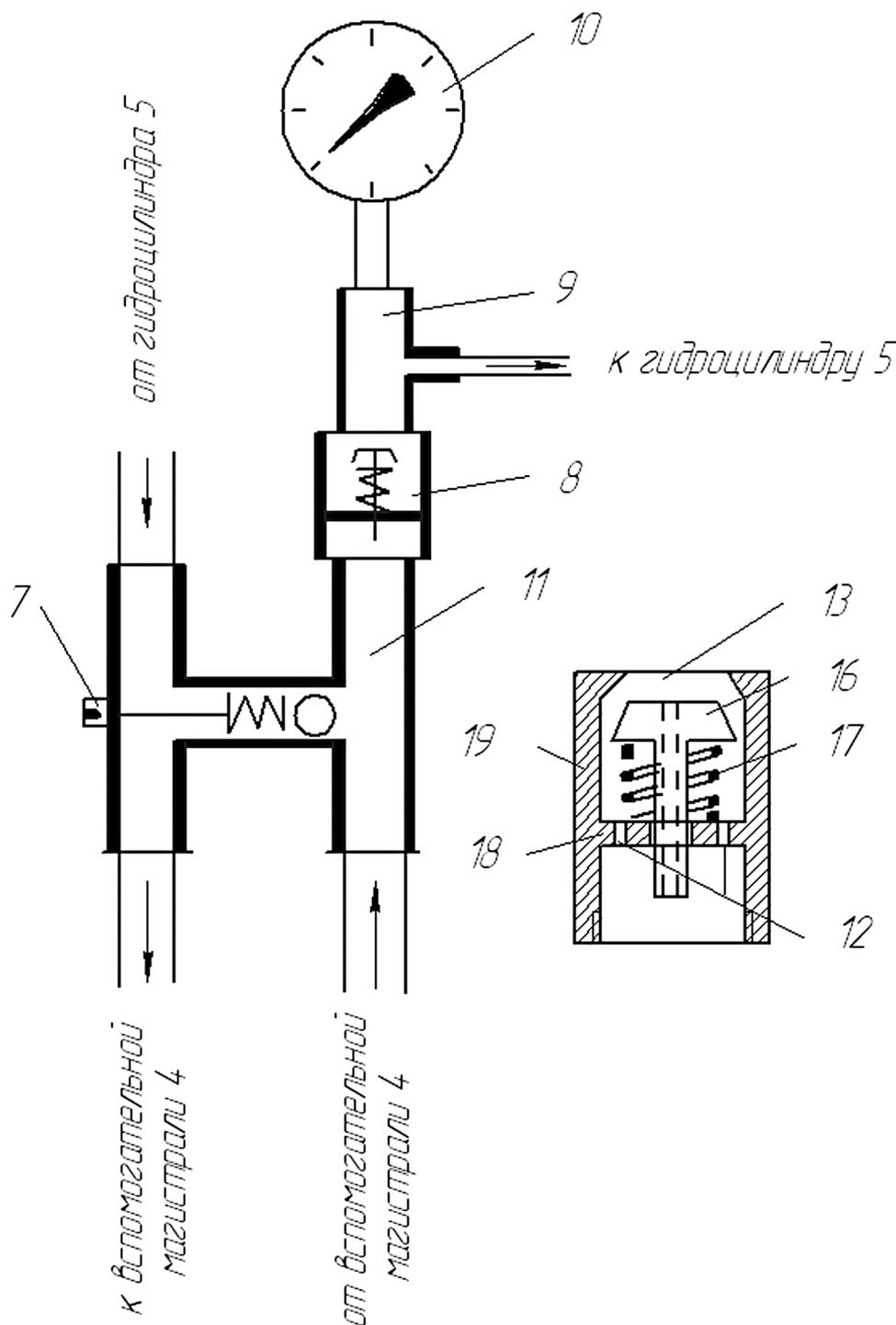


Рис. 3. Схема гидрозамка с дросселирующе-предохранительным клапаном

тей, разделенных между собой перегородкой 18 со сквозными отверстиями 14 и центральным отверстием 15, в котором установлен подпружиненный, при помощи пружины 17, дросселирующий клапан тарельчатого типа 16, тройника 9 с манометром 10.

Предлагаемая гидравлическая система работает следующим образом: от гид-

рораспределителя 2, трактора или самоходного шасси рабочая жидкость (масло) при помощи насоса 1 нагнетается в корпус 11 гидрозамка 6. Через входную полость 12 дросселирующе-предохранительного клапана 8 и сквозные отверстия 14 перегородки 18 часть масла поступает в выходную полость 13. Совместно с пружиной 17 масло прижи-

мает дросселирующий клапан тарельчатого типа 16 к внутренней поверхности выходной полости 13, выполненной в форме, идентичной форме тарельчатого клапана, уменьшая расход жидкости, проходящей через выходную полость 13 до конструктивных параметров. Затем рабочая жидкость через присоединенный к корпусу 19 дросселирующе-предохранительного клапана 8 тройник 9 с манометром 10 и напорную магистраль 3 нагнетается в надпоршневую полость силового гидроцилиндра 5, заставляя выдвигаться шток силового гидроцилиндра 5. Избыток рабочей жидкости в нагнетательной магистрали 3 перепускается через обратный подпружиненный клапан 7 во вспомогательную магистраль 4. Сюда же поступает масло из нижней (подпоршневой) полости силового гидроцилиндра 5. Выдвижение штока силового гидроцилиндра 5 осуществляется принудительно, с постоянной скоростью и меняется только при изменении диаметра тарельчатого клапана 16.

Применение данной гидросистемы позволит более качественно производить операции при выполнении лесовосстановительных работ на нераскорчеванных вырубках степной и лесостепной климатических зон Среднего Поволжья.

При предлагаемом технологическом приеме имеют место следующие уравнения, описывающие движение фрезы при измельчении пней [8]

$$\omega = \omega_0 = \text{const}, \quad (1)$$

$$M \dot{v} = Mg \cos \alpha - P_z - F_k. \quad (2)$$

где  $F_k$  – компенсирующая сила подачи, Н.

Для численного интегрирования полученных уравнений движения фрезы методом Рунге-Кутта разработана компьютерная программа [9, 10], которая позволяет определять значения скорости конической фрезы  $\theta(t)$ , пройденного ею расстояния  $z(t)$ , сталкивающих сил  $R_A(t)$  и сил реакции  $R_B(t)$  верхнего крепления фрезы, значения режущих сил и величину подачи  $\Pi(t)$ .

Для качественной оценки возможностей предлагаемого технологического приема измельчения пня с использованием компенсирующей силы привода допустим, что

$v^{0,7} \approx v$ . Тогда из уравнения (2) получим линеаризованное уравнение

$$\dot{v} = g \cos \alpha - P_{z*} - F_k \frac{\pi}{4}, \quad (3)$$

где

$$P_{z*} = E_* v, \quad E_* = k_{pz} \frac{3R(HB)^{0,75}}{nM\omega^{0,7}}, \quad F_k = \frac{F_k}{M}.$$

После преобразований выражения получим следующее уравнение поступательного движения рабочего органа

$$\dot{v} + E_* v = g \cos \alpha - F_k. \quad (4)$$

Его аналитическое решение с учетом начальных условий  $v(0) = v_0$  имеет вид

$$v = \left( v_0 - \frac{g \cos \alpha - F_k}{E_*} \right) e^{-E_* t} + \frac{g \cos \alpha - F_k}{E_*}. \quad (5)$$

Как видим из уравнения (5), варьируя начальной скоростью  $v_0$  и приведенной компенсирующей силой  $F_k$ , можно добиваться необходимых переходных процессов измельчения пня и минимизации сталкивающих сил или сил реакции в верхнем креплении рабочего органа.

Например, можно проводить измельчение пня с нулевой начальной скоростью. Вращающаяся с постоянной угловой скоростью  $\omega = \omega_0 = \text{const}$  и скоростью подачи  $v_0 = 0$ , фреза устанавливается на торцевую поверхность пня. Это возможно при использовании компенсирующей силы поддерживающего привода, равной силе тяжести конической фрезы с жидкостным наполнителем  $F_k = g \cos \alpha$ .

Затем, с помощью поддерживающего привода компенсирующую силу уменьшают до заданной величины, и за счет силы тяжести механизм начинает измельчение пня. При таком технологическом приеме сталкивающая сила и сила реакции плавно возрастают от нуля до постоянной минимальной величины, в отличие от применяемого технологического приема с постоянной подачей, когда эти силы резко изменяются от некоторой постоянной величины, не равной нулю, до другой постоянной величины.

Кроме изменения характера действия сталкивающих сил и сил реакции, при рекомендуемом технологическом приеме можно управлять временем переходных процессов измельчения пня.

Небольшим наклоном на угол  $\alpha$ , полностью заполненного жидкостью фрезы, можно еще уменьшать сталкивающие силы до минимальных значений, следя при этом, чтобы силы реакции не превышали допустимых значений.

Для выбора оптимальных технологических параметров при помощи автоматизированного расчета получены регрессионные уравнения, описывающие зависимости силы сталкивания  $R_a$  и силы реакции  $R_b$  в верхнем креплении конической фрезы от начальной скорости подачи  $v_0$  и угловой скорости вращения  $\omega$  и компенсирующей силы  $F_k$  при угле наклона режущих кромок  $\gamma = 45^\circ$

$$R_a = 555061497 + 2809,8652 W^2 - 5,8388 F_k^2 \quad (6)$$

$(0 < W, 1/c < 16; 9720 < F_k, H < 9800)$

$$R_b = 9,258 - 21280,801 W^2 - 97,4964 F_k^2 \quad (7)$$

$(0 < W, 1/c < 20; 9740 < F_k, H < 9800)$

Анализ значений, полученных при помощи уравнений, показал, что наименьшую величину сталкивающая сила  $R_a$  и сила реакции  $R_b$  имеют при угловой скорости вращения 5–15 1/с, начальной скорости подачи, равной 2–4,5 мм/с и компенсирующей силы 9740–9800 Н.

### Библиографический список

1. Винокуров, В.Н. Машины и механизмы лесного хозяйства и садово-паркового строительства: учебник для вузов / В.Н. Винокуров, Г.В. Силаев, А.А. Золотаревский; под ред. В.Н. Винокурова. – М.: Академия, 2004. – 400 с.
2. Галанов В.Н. Механизация расчистки лесных площадей при лесовосстановлении : экспресс-информация / В.Н. Галанов. – М.: ЦБНТИ, 1979. – 26 с.
3. Машины и механизмы лесного хозяйства. Оборудование для корчевки пней и подготовки почвы на вырубках: метод. указания к лабораторно-практ. работам / сост. И.М. Бартнев, М.В. Драпалюк, Е.В. Карамышев. – Воронеж: ВГЛТА, 2007. – 24 с.
4. Цыплаков, В.В. Об измельчении пней конической фрезой с жидкостным наполнителем / В.В. Цыплаков, С.В. Фокин // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – 2009. – № 2. – С. 115–117.
5. Рабочий орган для измельчения пней: Пат. на полезную модель 68853 Рос. Федерация: А 01 G 23/06 / Цыплаков В. В., Васильев А. Н., Шпортько О. Н., Фокин С. В.; заявитель и патентообладатель Саратовский ГАУ. – № 2006109842; заявл. 27.03.2006; опубл. 10.12.2007, Бюл. № 34.
6. Машина для измельчения пней: Пат. на полезную модель № 75133 Рос. Федерация : А 01 G 23/06 / Цыплаков В. В., Шпортько О. Н., Фокин С. В.; заявитель и патентообладатель Саратовский ГАУ. – № 2008110127; заявл. 17.03.2008 ; опубл. 27.07.2008, Бюл. № 21.
7. Гидравлическая система лесохозяйственных машин: Пат. 2386233 Рос. Федерация : А 01 В 63/104 / Цыплаков В. В., Фокин С. В., Рыхлов Р.А.; заявитель и патентообладатель Саратовский ГАУ. – № 2008144084; заявл. 05.11.2008 ; опубл. 20.04.2010, Бюл. № 11.
8. Яблонский, А.А. Курс теоретической механики / А.А. Яблонский – Ч. 2 / Динамика.– М.: Высшая школа, 1977.– 283 с.
9. Цыплаков, В.В. Компьютерная программа для расчета технологических параметров измельчения пней конической фрезой с жидкостным наполнителем / В.В. Цыплаков, С.В. Фокин // Инновации в науке и образовании. – 2008. – № 6(41). – С. 13.
10. Расчет технологических параметров измельчения пней конической фрезой с жидкостным наполнителем: программа для ЭВМ / Цыплаков В.В., Фокин С. В.; правообладатель Саратовский ГАУ. – Заявка № 2009613442. – Св-во о гос. рег. программ для ЭВМ № 2009614671; зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 01.09.2009.

**Павленко А.Н., Жуков В.Е. ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ САМОПОДДЕРЖИВАЮЩИХСЯ ФРОНТОВ ИСПАРЕНИЯ В НАНОЖИДКОСТИ В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ.**

В работе представлены результаты экспериментального исследования динамики распространения самоподдерживающегося фронта испарения при ступенчатом тепловыделении на горизонтально ориентированной цилиндрической поверхности во фреоне-21 в условиях свободной конвекции. Получены опытные данные по скорости распространения и структуре фронтов вскипания и испарения как в чистой жидкости, так и при добавлении в жидкость наноразмерных частиц. Показано, что добавление 0.03 объемных % частиц SiO<sub>2</sub> размером 20–25 нм существенно увеличило скорость распространения фронта испарения.

Ключевые слова: кипение, фронт испарения, нестационарный теплообмен, кризисные явления, неустойчивость на межфазной границе, эксперимент, наножидкость, наночастица.

**Pavlenko A.N., Zhukov V.E. PECULIARITIES OF SELF-SUSTAINED EVAPORATION FRONTS PROPAGATION DYNAMICS IN NANOLIQUID UNDER NONSTATIONARY HEAT GENERATION CONDITIONS.**

The paper presents the results of experimental research of the propagation dynamics of self-sustaining evaporation front at gradual heat generation on horizontal cylindrical surface in Freon-21 at free convection. The experimental data on propagation velocity and structure of boiling and evaporation fronts both in pure liquid and in the one added with nano-dimensional particles have been obtained. It is shown that addition of 0.03 volume % of SiO<sub>2</sub> particles with dimensions 20–25 nm significantly increases propagation velocity of evaporation front.

Key words: boiling, evaporation front, unsteady heat transfer, crisis phenomena, interface instability, experiment, nanofluid, nanoparticle.

**Фиговский О.Л. ЧТО ЕЩЕ ЖДАТЬ ОТ НАНОТЕХНОЛОГИЙ?**

Представлен краткий обзор современных нанотехнологий. Показана возможность использования нанобиотехнологий для развития агрокультуры на современном уровне с использованием наноматериалов, в частности для обработки и трансформации семян растений и других биологических объектов. Обсуждены новые возможности в создании наночипов и имплантируемых биодатчиков для тестирования вредных и опасных веществ в недоступных для инструментальной идентификации количествах, а также для высокоэффективной биотрансформации целлюлозных материалов в биотопливо.

Ключевые слова: нанотехнологии, нанобиотехнологии.

**Figovsky O.L. WHAT WE HAVE IN THE FIELD OF NANO TECHNOLOGY?**

It is reviewed the advanced of nano technology. The possibility of using nano biotechnology for the development of agriculture at a modern level using nano-matin the creation of nano sensors and implantable biosensors for testing of hazardous and noxious substances in reach of instrumental identification numbers, as well as for high biotransformation of cellulosic material into biofuels, in particular for the processing and transformation of plants and other biological objects.

Key words: nano technology, nano biotechnology.

**Обливин А.Н., Лопатников М.В. ДЛИТЕЛЬНАЯ ПРОЧНОСТЬ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ.**

В статье рассмотрены вопросы, связанные с теоретическим подходом к прогнозированию изменения физических свойств композита во времени как на стадии изготовления, так и на стадии его дальнейшей эксплуатации, а также теоретический подход к решению вопросов, связанных с изменением во времени структуры материала как результат воздействия на материал отрицательных и положительных температур, усушки и влажности не только на макро- и микро, но и на наноуровне.

Ключевые слова: длительная прочность, композиционные материалы, адгезия, когезия.

**Oblivin A.N., Lopatnikov M.V. LONG-TERM STRENGTH OF COMPOSITE MATERIALS.**

The article considers the issues related to the theoretical approach to the forecasting of changes in the physical properties of the composite in time and health, both at the stage of manufacture, so, and on the stage of its further ex-exploitation, as well as a theoretical approach to the solution of issues, associated with the change in time structure of a material, as a result of the impact on the material of negative and positive temperatures, shrinking and humidity not only at the macro and micro, but also at the nanolevel.

Key words: long-term strength, composite materials, adhesion, cohesion.

**Адамов М.Г., Адамова Р.М., Багандов Ш.Б., Гамзатова Х.М. ЛЕСНЫЕ ПОЖАРЫ И АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЛЕСОВОССТАНОВЛЕНИЯ НА ГАРЯХ.**

Статья посвящена анализу состояния лесного хозяйства после катастрофических лесных пожаров в России летом 2010 г. Показаны причины, последствия этих пожаров и возможности лесовосстановления на горях, в т. ч. в Республике Дагестан.

Ключевые слова: лесные пожары, Лесной кодекс РФ (2006), точки водоснабжения, микориза.

**Adamov M.G., Adamova R.M., Bagandov S.B., Gamzatova K.M. FOREST FIRES AND SOME CHALLENGES OF REFORESTATION ON BURNED AREAS (FIRE SITES).**

The article is devoted the analysis of the situation in forest economy after catastrophic forests fires in Russia in summer of 2010. It discusses the reasons, the consequences of the above fires and the possibilities of restoring forests on the burned areas in the Republic of Daghestan.

Key words: The site of a fires forests, forest code RF (2006), watersupply points, mikorisa.

**Аксенов П.А., Коровин В.В. СТРОЕНИЕ ТОПЛЯКОВОЙ ДРЕВЕСИНЫ ДУБА.**

Изучено строение древесины мореного дуба с использованием методов световой микроскопии. Выявлен ряд структурных признаков, присущих топляковой древесине дуба. Сделаны выводы о причинах и механизмах формирования специфических особенностей топляковой древесины дуба в условиях пресного водоема.

Ключевые слова: дуб, мореная древесина, микроструктура.

**Axenov P.A., Korovin V.V. STRUCTURE OF THE SUNK WOOD OF OAK.**

The structure of the stained oak wood has been studied by using techniques of light microscopy. A number of structural features of stained oak have been described. The conclusions about the causes and mechanisms of formation of the specific features of the stained oak wood in a freshwater reservoir have been made.

Key words: oak, stained wood, the microstructure.

**Воропаева Н.Л., Ибралиу А.З., Фиговский О.Л., Кадиси Н., Варламов В.П., Карпачев В.В. РЕГУЛИРОВАНИЕ РОСТА, РАЗВИТИЯ И ПРОДУКТИВНОСТИ РАСТЕНИЙ ОЛИГОХИТАЗАНОМ В СОСТАВЕ ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНЫХ (НАНО)ЧИПОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ НАНОТЕХНОЛОГИЙ.**

Разрабатывается экологически безопасная (нано)технология для предпосевной обработки семян кукурузы с использованием физиологически активных полифункциональных многокомпонентных (нано)чипов различного состава на основе биопестицидов – производных полисахаридов (хитина, целлюлозы) и природных минералов с применением нанотехнологических подходов при их создании, когда семя рассматривается как нанообъект, препараты готовятся в виде (нано)чипов, а способ их нанесения осуществляется путем (нано)технологии. Полученные результаты испытаний позволяют сделать заключение о высокой эффективности разрабатываемой (нано)технологии предпосевной обработки семян, в частности, кукурузы, что открывает большие перспективы для применения этой технологии на различных культурах.

Ключевые слова: рост растений, развитие, урожайность, нанотехнология.

**Voropaeva N.L., Ibraliy A.Z., Figovsky O.L., Kadiasi N., Varlamov V.P., Karpachev V.V. PLANT GROWTH, DEVELOPMENT AND PRODUCTION REGULATION BY OLIGOCHITOSAN AS A PART OF POLYFUNCTIONAL (NANO) CHIPS WITH THE HELP OF NANOTECHNOLOGY.**

Developing environmentally friendly (nano) technology for pre-treatment of corn seeds with physiologically active multifunctional multi (nano) chips of different composition on the basis of biopesticides – derivatives of polysaccharides (chitin, cellulose), and natural minerals with the use of nanotechnology approaches to their creation, when the seed is regarded as nanoobject, the compositions are prepared in the form of (nano) chips, and the way their application is carried out by (nano) technologies. Results obtained allow to conclude that the developed high-efficiency (nano) technologies pre-sowing treatment of seeds, particularly corn, which holds great promise for the application of this technology in different cultures.

Key words: plant growth, development, production, regulation, nanotechnology.

**Федотов Г.Н., Рудометкина Т.Ф., Шалаев В.С. ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ НА СВОЙСТВА ПОЧВ.**

Изучено влияние олеата натрия, Tween 20 (полиоксиэтилен (20) сорбитан монолаурата) и Tween 60 (полиоксиэтилен (20) сорбитан моностеарата) на водоустойчивость почвенной структуры, степень набухания, гидролитическую кислотность и каталазную активность почв. Установлено, в процессе введения поверхностно-активных веществ в почвы происходит изменение наноструктурной организации гумусовой матрицы почвенных гелей, что приводит к изменению свойств почв. На основе анализа полученных результатов и литературных данных предложен механизм процесса изменения наноструктурной организации почвенных гелей. Сделан предварительный вывод о том, что максимальная водоустойчивость почвенной структуры будет характерна для модификаторов, вызывающих повышение гидрофильности супермолекул гумусовых веществ и набухание фрактальных кластеров из них, но не приводящих к сегрегации органической матрицы.

Ключевые слова: почва, гумусовые вещества, почвенные гели, наноструктура.

**Fedotov G.N., Rudometkina T.F., Shalaev V.S. INFLUENCE OF SURFACE-ACTIVE SUBSTANCES ON PROPERTY OF THE SOILS.**

On the basis of the analysis of the received results and literary data, the mechanism of process of change of nanostructure organization has been offered to the soil gels. It is drawn a preliminary

conclusion that the maximal water-stability of soil structure will be characteristic for the modifiers causing increase hydrophilicity of supermolecules of humus substances and swelling fractal clusters from them, but they are not leading to the segregation of the organic matrix.

Key words: soil, humus substances, soil gels, nanostructure.

**Федотов Г.Н., Шалаев В.С., Поздняков А.И., Пузанова А.Е. ОБРАЗОВАНИЕ ДИССИПАТИВНЫХ СТРУКТУР ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ВОЗДУШНО-СУХИХ ПОЧВ С ВОДОЙ.**

При изучении взаимодействия воздушно-сухих почв с водой обнаружено, что нарастающие напряжения сдвига происходят не монотонно, а в колебательном режиме. В одних случаях возникали периодические колебания, в других случаях периодичность отсутствовала. Было выдвинуто предположение о возникновении при взаимодействии воздушно-сухих почв с водой диссипативных структур. С позиций синергетики и образования почвенных гелей из фрактальных кластеров из супермолекул гумусовых веществ предложено объяснение механизма наблюдаемого явления.

Ключевые слова: почвенные гели, диссипативные структуры, вода.

**Fedotov G.N., Shalaev V.S., Pozdnyakov A.I., Puzanova A.E. FORMATION OF DISSIPATIVE STRUCTURES WHEN AIR-DRY SOIL INTERACT WITH WATER.**

While studying the interaction of air-dry soil with water, it was found that the increase in shear stress is not monotonic, but in an oscillatory mode. In some cases, there were periodic oscillations, in other cases, the periodicity was absent. It has been suggested to occur dissipative structures in this case. From the standpoint of synergetics and formation of soil gels proposed to explain the mechanism of the observed phenomena.

Key words: soil gels, dissipative structures, water.

**Федотов Г.Н., Шалаев В.С. МИНЕРАЛЬНЫЕ НАНОЧАСТИЦЫ В ГУМУСОВОЙ МАТРИЦЕ ПОЧВЕННЫХ ГЕЛЕЙ.**

В работе методом сравнительного исследования изображений на растровом электронном микроскопе во вторичных и отраженных электронах была оценена возможность существования в почвах мозаичной матрицы органо-минеральных почвенных гелей. С помощью просвечивающего электронного микроскопа изучили роль неорганических наночастиц в сегрегации гумусовой матрицы почвенных гелей. Проведенные эксперименты свидетельствуют, что почвенные гели, выделенные из различных горизонтов дерново-подзолистой почвы, не представляют собой мозаичной органо-минеральной матрицы, а минеральные наночастицы не являются зародышами, стимулирующими сегрегацию гумусовой матрицы почвенных гелей.

Ключевые слова: минеральные наночастицы, гумусовая матрица, почвенные гели.

**Fedotov G.N., Shalaev V.S. MINERAL NANOPARTICLES IN THE HUMUS SOIL OF THE MATRIX GELS.**

In this paper the method of comparative study of the images on a scanning electron microscope has been evaluated the possible existence of a mosaic matrix in the organo-mineral soil gels. Using transmission electron microscopy investigated the role of inorganic nanoparticles in the segregation of humus matrix of soil gels. The experiments indicate that soil gels, extracted from different horizons of sod-podzolic soil, do not constitute a mosaic organo-mineral matrix, and mineral nanoparticles are not embryos, challenging segregation this matrix.

Key words: mineral nanoparticles, humic matrix, soil gels.

**Коротков В.Н., Романовская А.А., Карабань Р.Т., Смирнов Н.С. ОЦЕНКА УГЛЕРОДНОГО БЮДЖЕТА ЛЕСОВ РОССИИ В РАМКАХ ОТЧЕТНОСТИ ПО КИОТСКОМУ ПРОТОКОЛУ.**

Представлены результаты расчета углеродного бюджета управляемых лесов России (без учета кустарников), включающего абсорбцию углекислого газа лесами и выбросы парниковых газов в результате рубок, пожаров и других причин гибели древостоев, а также осушения заболоченных лесов. Результирующий углеродный бюджет управляемых лесов представляет собой отчетность Российской Федерации по пункту 4 статьи 3 Киотского протокола. С 1990 по 2009 г. управляемые леса выступали стоком углекислого газа от 116,3 Мт CO<sub>2</sub>-экв. год<sup>-1</sup> в 1990 г. до 534,6 Мт CO<sub>2</sub>-экв. год<sup>-1</sup> в 2009 г.

Ключевые слова: парниковые газы, Киотский протокол, управляемые леса, углеродный бюджет

**Korotkov V.N., Romanovskaya A.A., Karaban' R.N., Smirnov N.S. ASSESSMENT OF CARBON BUDGET OF RUSSIA'S FOREST FOR REPORTING UNDER KYOTO PROTOCOL.**

Results of the calculation of carbon budget of the Russia's managed forests (excluding shrubs) are presented. Carbon budget includes the absorption of carbon dioxide by forests and greenhouse gases emissions caused by logging, fires and other causes of death of trees, and draining of boggy forests. The resulting carbon budget of managed forests is a reporting of the Russian Federation under paragraph 4 of Article 3 of the Kyoto Protocol. From 1990 to 2009, the Russia's managed forests were a sink of carbon dioxide away from the 116.3 Mt CO<sub>2</sub>-eq. year<sup>-1</sup> in 1990 to 534.6 Mt CO<sub>2</sub>-eq. year<sup>-1</sup> in 2009.

Key words: greenhouse gases, Kyoto protocol, managed forest, carbon budget.

**Родин А.Р., Калашникова Е.А. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ НАНОТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ПОДГОТОВКЕ СЕМЯН К ПОСЕВУ.**

В статье рассматриваются вопросы применения нанотехнологий и квантово-резонансной технологии, которые активизируют физиолого-биохимические процессы семян, в результате чего повышается их грунтовая всхожесть, усиливается рост проростка.

Ключевые слова: семена, проростки, хвойные породы, нанотехнологии.

**Rodin A.R., Kalashnikova E.A. THEORETICAL AND PRACTICAL ASPECTS OF NANOTECHNOLOGY IN PREPARING CONIFER SEEDS FOR SOWING.**

Nanotechnology applications in the preparation of conifer seeds for sowing activates the vital functions of the biological system of seeds increases germination and enhances the growth of seedlings, sprouts and seedlings.

Key words: seeds, seedlings, conifer, nanotechnology.

**Романовский М.Г. УГЛЕРОД ДРЕВНИХ ПОЧВ – ИСТОЧНИК ЭМИССИИ С В АТМОСФЕРУ.**

Оценена эмиссия углеродсодержащих газов из почвы лесостепных экосистем европейской России. Избыточный расход С на прирост гетеротрофной биомассы обеспечен разрушением запасов почвенного С и определяет  $NEP \approx -0.65$  т С га<sup>-1</sup> год<sup>-1</sup>. Однако основной поток CO<sub>2</sub> из древних почв до-московского генезиса  $\sim 5$  т С га<sup>-1</sup> год<sup>-1</sup> связан с автокаталитическим разложением почвенной органики и эмиссией С из глубинных слоев почво-грунта над зеркалом грунтовых вод. Поток углеродсодержащих газов из древних почв может обеспечить основную

часть наблюдаемого подъема концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере. Климат планеты находится в преддверии аналога Одинцовского периода.

Ключевые слова: углерод почв, C атмосферы, лесостепь, эмиссия C.

**Romanowsky M.G. THE CARBON OF ANCIENT SOILS – THE SOURCE OF C EMISSION INTO ATMOSPHERE.**

The estimate of carbon gases emission from the soils of forest-steep regions of European Russia are considered. The surplus consumption of C by heterotrophic organisms for their yearly biomass growth require destruction of the soil C and lead to NEP = – 0.65 t C ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>. But the main CO<sub>2</sub>-flux from the ancient soils of pre Moscow glaciation's genesis go to ~5 t C ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> due to the auto catalytic destruction of organic matter and to C-emission from deep soil layers up the soil-water table. The carbon gases emission from the ancient soils may feed the most part of nowadays rise of CO<sub>2</sub> concentration in the atmosphere. The Global climate go on the threshold of Odintsovsky interstitial analogue.

Key words: soil carbon, atmospheric carbon, forest-steep, C-emission.

**Романовский М.Г. ПОЛИТЕННАЯ МОДЕЛЬ РАБОТЫ КАМБИЯ.**

Деление камбиальных инициалей рассмотрено как процесс автоматического распределения копий ДНК из политенных хромосом по хромосомам дочерних клеток. Деление инициали раз в ~20 дней порождают радиальные кванты волокнистых элементов древесины, складывающиеся в годичное кольцо. У хвойных и кольцесосудистых пород в кванте 16 клеток; у рассеяннососудистых – 8. Примерно в 0.5 случаев кванты теряют или получают дополнительно полуквант. Политения свойственна клеткам меристем, эмбриональных и фотосинтезирующих структур, защищает их от давления мутаций и позволяет дифференцировать производные клетки.

Ключевые слова: камбий, политения, меристемы, эмбриогенез.

**Romanowsky M.G. POLYTENIC MODEL OF CAMBIUM ACTING.**

The cambium initials divisions are considered as an automatical reduction of DNA copies from polytene chromosomes of initial cell to the chromosomes of daughter cells. Initial cell division once ~20 days create the radial portions of tracheal elements constructed a tree ring. Such cell quantum consist of 16 cells in conifers and ring-porous species, and of 8 cells in woods with a dispersal pours. In about of 0.5 cases the radial portions of tracheid loose a half-quantum or get a half-quantum additional. Polytene chromosomes is a typical feature of the meristematic, embryonic and photosynthetic structures: polytene defend the cells from mutations and lead the differentiation of offspring cells.

Key words: cambium, polytene, meristems, embryogenesis.

**Романовский М.Г., Мамаев В.В. ДИНАМИКА АКТИВНОСТИ ПОГЛОЩАЮЩИХ КОРНЕЙ ДУБА.**

Гумидизация вегетационного периода в лесостепи европейской России нарушает импульсивность и синхронность роста микоризных поглощающих корней в разных экотопах. Предложена модель изменений прироста и интенсивности дыхания поглощающих корней в лесостепной дубраве при водном потенциале «пахотного» горизонта 0 ч -1.4 МПа. По мере исчерпания почвенной влаги дыхание затухает по одной из двух зависимостей (интенсивной или нормальной).

Ключевые слова: лесостепь, поглощающие корни, дыхание корней, прирост корней.

**Romanowsky M.G., Mamaev V.V. OAK ABSORBING ROOTS ACTIVITY DYNAMICS.**

Growth activity of the oak mycorrhizal absorbing roots in the forest-steppe of European Russia has lost its impulsive and synchronic in different sites character in response to the vegetations climate humidification. We are presenting the model of changes in absorbing roots growth and respiration in a forest-steppe oak stands as a function of a plowing layer soil water potential on 0 ч -1.4 МПа intervals. Respiration is falling by one of two ways (intensive or normal) in reply on soil water resource going to the limit.

Key words: forest-steppe, absorbing roots, root respiration, root growth.

**Хромова Л.В., Романовский М.Г. К ВОПРОСУ О НАЗВАНИЯХ КЛЕТОК МУЖСКОГО ГАМЕТОФИТА СОСНЫ.**

В современных российских статьях терминология микроспорогенеза сосны запутана благодаря смешению названий, принятых разными эмбриологическими школами. Необходима унификация терминологии с возвратом приоритетных названий клеток микрогаметофита, представленных в классических работах, в соответствии с принципами ботанической номенклатуры.

Ключевые слова: сосна, микроспорогенез, клетки микрогаметофита.

**Khromova L.V., Romanowsky M.G. TO THE PROBLEM OF PINE MICROGAMETOPHYTE CELLS NAMES.**

In recent Russian investigations on the differentiation of microgametophytes in pine the cell descriptions is very tangle dew to mixture of names we have got in the different embryological schools. We need some unification of terminology with the return to priority names have given in the classic works according the Principe of botanical nomenclature.

Key words: scotch pine, microsporogenesis, microgametopyte cells.

**Чернышенко О.В., Загреева А.Б. СОЗДАНИЕ ПРИРОДНЫХ ПОПУЛЯЦИЙ РЕДКИХ И ИСЧЕЗАЮЩИХ ВИДОВ С ПОМОЩЬЮ КЛОНАЛЬНОГО МИКРОРАЗМНОЖЕНИЯ.**

Применение нанотехнологии позволяет решить важные задачи селекции на устойчивость, высокую продуктивность и качество, регулировать и автоматизировать выращивание растений. Одно из научных направлений кафедры ботаники и физиологии растений в ближайшем будущем – использование изолированных клеток и тканей для сохранения ценного лесного генофонда. Цель наших исследований – усовершенствование методов биотехнологии для получения посадочного материала редких и исчезающих видов и возвращение их в лесопарки Москвы.

Ключевые слова: городские леса, Красная книга Москвы, создание популяций, био- и нанотехнологии.

**Chernyshenko O.V., Zagreeva A.B. CREATING NATURAL POPULATIONS OF RARE AND ENDANGERED SPECIES BY MEANS OF CLONING MICROPROPAGATION.**

Nanotechnology application makes it possible to solve certain important tasks of selection aimed at good tolerance, high actual yield and good quality of wood, to control and to operate automatically plants growing. One of the research trends under development at Botany and Plant Physiology Department in the nearest future deals with using separate plant cells and some tissues

to protect the valuable forest genebank. The target of our research is to improve biotechnological techniques to produce planting material of rare and endangered species and to reintroduce them in Moscow municipal forests and parks.

Key words: urban forest, Red Data Book of Moscow, creation of population, bio and nanotechnology.

**Чернышенко О.В., Румянцев Д.Е. ДЕНДРОХРОНОЛОГИЧЕСКИЙ МЕТОД ОТБОРА ДЕРЕВЬЕВ ДЛЯ ДАЛЬНЕЙШЕГО МИКРОКЛОНАЛЬНОГО РАЗМНОЖЕНИЯ ИХ С УЧЕТОМ ПРОДУКТИВНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ ВИДОВ.**

Для лесохозяйственного производства является актуальным размножение древесных растений в возрасте выше 20 лет, когда можно оценить их хозяйственноценные признаки. Дендрохронологический метод позволяет проводить отбор маточных деревьев с исключительными лесохозяйственными свойствами, а используя методы клонального микроразмножения, можно получать растения, генетически идентичные исходному материалу.

Ключевые слова: дендрохронология, устойчивость, продуктивность, плантации, нанотехнологии

**Chernyshenko O.V., Rumyantsev D.E. TREE-RING METHOD OF SELECTING TREES FOR THEIR FURTHER MICRO-CLONING PROPAGATION TAKING INTO ACCOUNT YIELD AND SPECIES RESISTANCE.**

The propagation of woody plants aged 20 years, when it is easy to estimate their economic characteristics, is of great significance for forestry management. Tree-ring method makes it possible to select mother trees with the best silvicultural properties. By means of micro-cloning propagation plants, genetically identical to parent material, can be produced on a large scale.

Key words: dendrochronology, resistance, productivity, plantations, nanotechnology

**Шишкина О.К., Завистяева М.А., Рабцун А.С. НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ АНАЛИЗА ДНК ДЛЯ ГЕНЕТИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ КЛОНОВ НА ЛСП СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ.**

В статье рассказывается о молекулярно-генетическом методе, удобном для идентификации клонов древесных пород, и приводятся данные о его практическом использовании.

Ключевые слова: ДНК, анализ, сосна обыкновенная.

**Shishkina O.K., Zavistjaeva M.A., Rabtsun A.S. SOME RESULTS OF PRACTICAL APPLICATION THE ANALYSIS OF DNA FOR GENETIC IDENTIFICATION ON FOREST SEED PLANTATION PINES ORDINARY.**

This publication talk about molecular-genetic methods, which is convenient for identification clones of tree species, and includes data about its practical use.

Key words: DNA, analysis pines ordinary.

**Азаров В.И., Винославский В.А., Зарубина А.Н., Кондратьев А.В. ФОРМИРОВАНИЕ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУР В ДЕКОРАТИВНО-ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЯХ.**

Показана возможность применения в качестве пропиточных составов текстурных бумаг полиакрилатных нанодисперсий марок Finndisp А 2001, А 2002 и Acronal 500D. Установле-

но, что операция каландрования пропитанного и высушенного бумажного полотна повышает разрушающее усилие при растяжении декоративно-защитных пленок. Повышение прочности декоративно-защитных пленок обусловлено формированием кристаллических образований в полимерной матрице при ее растягивании.

Ключевые слова: композиции для пропитки декоративных бумаг, акриловые дисперсии на водной основе, стирол-акриловая дисперсия.

**Azarov V.I., Vinoslavskiy V.A., Zarubina A.N., Kondratiev A.V. FORMING OF NANOCRYSTALLINE STRUCTURES IN THE DECORATIVE AND PROTECTIVE COATINGS.**

Showing the possibility of use as impregnating compositions of texture papers polyacrylate nanodispersy brands Finndisp A 2001 and A 2002 and Acronal 500D. It is established that the operation of calendering impregnated and dried paper web increases the tensile breaking force of decorative and protective foils. Increase the service strength of decorative and protective foils due to the formation of crystalline structures in the polymer matrix when it is stretched.

Key words: compositions for impregnating decorative paper, water-acrylic dispersions, styrene-acrylic dispersion.

**Азаров В.И., Кононов Г.Н., Горячев Н.Л., Фаньковская А.А. МОДИФИЦИРОВАНИЕ МИКОЛОГИЧЕСКИ РАЗРУШЕННОЙ ДРЕВЕСИНЫ НАНОДИСПЕРСИЯМИ ЭЛЕМЕНТООРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ.**

В статье представлены результаты исследований компонентного состава микологически разрушенной древесины и выявления возможности химического модифицирования образцов нанодисперсиями элементоорганических соединений

Ключевые слова: микологически разрушенная древесина, нанодисперсии элементоорганических соединений.

**Azarov V.I., Kononov G.N., Goryachev N.L., Fankovskaya A.A. MODIFYING BY NANODISPERSION ELEMENT ORGANIC CONNECTIONS THE WOOD SUBJECT BY MYCOLOGIC INFLUENCE.**

The results of research of componental structure of wood subject by mycologic influence are presented in the article, for revealing of possibility chemical modifying of model nanodispersion of element organic connections.

Key words: Nanodispersion of element organic connections, mycological destruction of wood.

**Бельчинская Л.И., Вариводин В.А., Анисимов М.В. ПОЛУЧЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНОЙ ФАНЕРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕРМОАКТИВИРОВАННЫХ НАНОСОРБЕНТОВ.**

Исследованы сорбционные способности термоактивированных клиноптилолита и аэросила и их влияние на отверждение клеевой композиции и изделий на ее основе. Проведена оценка влияния исследуемых сорбентов на физико-механические свойства полученной фанеры. По результатам исследований выданы рекомендации по внедрению новой клеевой композиции для изготовления экологичной фанеры.

Ключевые слова: фанера, экологическая безопасность, формальдегид, термоактивация, сорбент.

**Belchitskaya L.I., Varivodin V.A., Anisimov M.V. THE RECEPTION OF ECOLOGICAL SAFE VENEER WITH USING OF THE THERMOACTUATE NANOSORBENTS.**

The sorbtion property of the thermoactuate clinoptilolite and aeropower and their influence upon the curing of the adhesive composition and products on its base are ivestigated. The impact of sorbents on physico-mechanical properties of plywood was received. The result of studies issued recommendations on introduction of new resin composition for the manufacture of environmentally friendly plywood.

Key words: veneer, ecological safety, formaldehyde, thermoactivation, sorbent.

**Богданова А.В., Кузнецова Т.Г., Иванкин А.Н. НАНОСЕНСОРНЫЙ АНАЛИЗ ЛЕ- ТУЧИХ КОМПОНЕНТОВ ДЛЯ ДИФФЕРЕНЦИАЦИИ ОБЪЕКТОВ РАСТИТЕЛЬНО- ГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ.**

Рассмотрена проблема идентификации древесных компонентов растительного происхождения с использованием мультисенсорной системы нанодатчиков. Показано, что аналитическая система VOCmeter позволяет идентифицировать различные по химическому строению вещества в парах и газовой среде в области концентраций от 0,001 до 5 мкг/мл, а также дифференцировать древесину по породам, в частности отличать опилки бука, березы и сосны. Исследования подтверждают возможность идентификации древесных компонентов в индивидуальном состоянии и смесях.

Ключевые слова: наносенсоры, анализ древесных компонентов.

**Bogdanova A.V., Kuznetsova T.G., Ivankin A.N. THE NANOSENSORIC ANALYSIS OF FLYING COMPONENTS FOR DIFFERENTIATION OF THE SUMPLES OF PLANT ORIGINE.**

The problem of identification of wood components and plant samples with use of multisensor system of nano sensors is considered. It is shown, that analytical system VOCmeter allows to identify various substances of chemical structure in vapor and gas environment in the field of concentration from 0,001 up to 5 mkg/ml, and also to differentiate wood on breeds, in particular to distinguish sawdust of a beech, a birch and a pine. Researches confirm an oppportunity of identification of wood components in an individual condition and mixes.

Key words: nano sensors, the analysis of wood components.

**Прошина О.П., Олиференко Г.Л., Евдокимов Ю.М., Иванкин А.Н. НАНОЦЕЛ- ЛЮЛОЗА И ПОЛУЧЕНИЕ БУМАГИ НА ЕЕ ОСНОВЕ.**

Определены теоретические и практические подходы к вопросу получения наноразмер- ных частиц целлюлозы путем ее химико-ферментативной обработки. Показано, что бумага, изготовленная из наноцеллюлозы характеризуется высокой прочностью на разрыв, которая практически на порядок превышала уровень прочности бумаги, изготовленной по обычной технологии.

Ключевые слова: наноцеллюлоза.

**Proshina O.P., Oliferenko G.L., Evdokimov Yu.M., Ivankin A.N. NANO-CELLULOSE AND RECEPTION OF A PAPER ON ITS BASIS.**

Theoretical and practical approaches to a question of the reception of nano particles of cellulose by means of chemical-enzyme method are investigated. It is shown, that the paper made of nano-cellulose is characterized by breaking strength which more, than on the order exceeds a level of durability of a paper produced on usual technology.

Key words: nano pulp.

**Пикулев В.Б., Логинова С.В. ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ НАНОКОМПОЗИТА «КРЕМНИЙ-ЦЕЛЛЮЛОЗА».**

В работе исследованы особенности фотолюминесценции композита, состоящего из нанокристаллической целлюлозы и нанокристаллического кремния. Показано, что эффективная фотолюминесценция композита сохраняется при воздействии на материал озона и низкотемпературной плазмы. Предполагается безызлучательный перенос энергии между продуктами деструкции молекул целлюлозы и кремниевыми наночастицами. Полученные нанокompозиты обладают также электретными свойствами, что может быть объяснено ионным механизмом переноса заряда.

Ключевые слова: фотолюминесценция, нанокристаллическая целлюлоза, нанокремний, зарядоперенос, нанокompозиты.

**Pikulev V.B., Loginova S.V. PHOTOLUMINESCENCE OF SILICON-CELLULOSE NANOCOMPOSITE.**

In this work we made photoluminescence characterization of nanomaterial composed of nanocrystalline cellulose and nanocrystalline silicon. We revealed an effective and stable luminescence of nanocomposite under ozone and low-temperature plasma exposure. We suppose nonradiative energy transfer between products of destruction of cellulose and silicon nanoparticles. The nanocomposite has also electret properties, which can be explain in model of ions transfer.

Key words: photoluminescence, nanocrystalline cellulose, nanosilicon, charge transfer, nanocomposite materials.

**Обливин А.Н., Семочкин А.Ю., Семочкин Ю.А., Лопатников М.В. МОДИФИКАЦИЯ КАРБАМИДОФОРМАЛЬДЕГИДНЫХ ОЛИГОМЕРОВ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ.**

В статье рассматривается модификация карбамидоформальдегидных олигомеров многослойными углеродными нанотрубками с помощью двух различных способов – дезинтеграторной и ультразвуковой обработки. Приводятся результаты оценки эффективности модификации карбамидных смол с различными мольными соотношениями карбамида к формальдегиду углеродными нанотрубками при горячем и холодном склеивании.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки, карбамидоформальдегидные смолы, предел прочности.

**Oblivin A.N., Semochkin A.Y., Semochkin Y.A., Lopatnikov M.V. MODIFICATION OF UREA-FORMALDEHYDE RESINS WITH CARBON NANOTUBES.**

In article is considered modification of urea-formaldehyde resins with multilayered carbon nanotubes by means of two various ways – disintegration and ultrasonic processing. Estimation results of efficiency of modification of urea-formaldehyde resins with various molar ratio by carbon nanotubes at hot and cold adhesion are presented.

Key words: carbon nanotubes, urea-formaldehyde resin, strength limit.

**Уголев Б.Н., Галкин В.П., Горбачева Г.А., Калинина А.А., Белковский С.Ю. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ НАНОСТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ДРЕВЕСИНЫ НА ЕЕ ДЕФОРМАТИВНОСТЬ.**

Доминантный признак древесины как природного “умного” материала – эффект памяти формы. Он основан на образовании *замороженных деформаций*. Они возникают вследствие временной перестройки наноструктуры древесины. Визуализация эффекта деформационной

памяти древесины была выполнена на лущеном шпоне. Нагруженные путем изгиба вдоль волокон влажные образцы сушили, разгружали и вновь увлажняли. Приведены также результаты исследования *редуцированной и замороженной усушки* древесины, возникающей под растягивающей нагрузкой поперек волокон.

Ключевые слова: деформационные превращения древесины, память формы древесины, замороженные деформации древесины, замороженная усушка древесины, редуцированная усушка древесины.

**Ugolev B.N., Galkin V.P., Gorbacheva G.A., Kalinina A.A., Belkovskiy S.U. EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE INFLUENCE OF THE NANOSTRUCTURE CHANGES ON WOOD DEFORMABILITY.**

The dominant feature of wood as natural «smart» material is «shape memory effect». It is based on the forming «frozen strains». They appear as the result of temporary reconstruction of wood nanostructure. Visualization of wood memory effect was carried out on the specimens of rotary-cut veneer. Wet specimens loaded by bending along the grain were dried, unloaded and again wetted. Results of the research of «reduced» and «frozen shrinkage» of wood appearing under the tension load across the grain are presented.

Key words: wood deformative conversions, wood shape memory, wood frozen strains, wood frozen shrinkage, wood reduced shrinkage.

**Угрюмов С.А., Цветков В.Е. НАНОМОДИФИЦИРОВАННЫЕ КЛЕЕВЫЕ СОСТАВЫ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ПЛИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ДРЕВЕСНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ И КОСТРЫ ЛЬНА.**

Предложены направления модификации синтетических смол на наноуровне с целью повышения качества осмоления костры льна и древесных наполнителей плитных материалов. Представлены некоторые экспериментальные данные по влиянию типа и количества наномодификаторов на термодинамические характеристики клеевых составов. Рекомендованы рецептуры модифицированных клеевых композиций, обеспечивающих полное смачивание костры льна.

Ключевые слова: древесный наполнитель, костра льна, клеевой состав, адгезия, смачивание, модификация, наномодификатор.

**Ugryumov S.A., Tsvetkov V.E. THE GLUTINOUS STRUCTURES MODIFIED AT NANO-LEVEL FOR MANUFACTURE OF PLATES ON THE BASIS OF WOOD FILLERS AND FLAX FIRES.**

Directions of updating of synthetic pitches on a nano-level for the purpose of improvement of quality of distribution of glue on a surface fires of flax and wood particles are offered. Some experimental data on influence of type and quantity of nano-modifiers on thermodynamic characteristics of glutinous structures are presented. Compoundings of the modified glutinous compositions providing full wetting fires of flax are recommended.

Key words: the Wood filler, a fire of flax, glutinous structure, adhesion, wetting, updating, the nano-modifier.

**Забелкин С.А., Файзрахманова Г.М., Герке Л.Н., Грачев А.Н., Башкиров В.Н. СИНТЕЗ ФЕНОЛФОРМАЛЬДЕГИДНЫХ СМОЛ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЖИДКИХ ПРОДУКТОВ БЫСТРОГО ПИРОЛИЗА ДРЕВЕСИНЫ.**

Целью данной работы является исследование процесса переработки пиролизной жидкости в химические товарные продукты. Использование пиролизной жидкости в качестве сы-

рья для химического производства позволит получать широкий спектр товарных продуктов. Проведенные исследования подтвердили возможность использования жидких продуктов быстрого пиролиза древесины в качестве химического сырья для производства товарных продуктов: СДО, фенолформальдегидной смолы, пленкообразующих материалов.

Ключевые слова: фенолформальдегидная смола, пиролизная жидкость, резольная смола.

**Zabelkin S.A., Fayzrahmanova G.M., Gehrke L.N., Grachev A.N., Bashkirov V.N. SYNTHESIS OF PHENOL FORMALDEHYDE RESINS USING LIQUID PRODUCTS FAST PYROLYSIS OF WOOD.**

The aim of this work is the study of the process of processing of pyrolysis liquid in the chemical commodity products. Use of pyrolysis liquid as a raw material for chemical production will allow to receive a wide range of commodity products. The studies have confirmed the possibility of the use of liquid products of fast pyrolysis of wood as a chemical raw materials for the production of commodity products: DLS, phenol formaldehyde resin, film-forming materials.

Key words: phenol-formaldehyde resin, pyrolysis liquid resol resin.

**Быков В.В., Голубев М.И. ЭФФЕКТИВНОСТЬ НАНОМАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ЛЕСНЫХ МАШИН ОТ КОРРОЗИИ ПРИ ХРАНЕНИИ.**

Показана необходимость противокоррозионных мероприятий при хранении лесных машин. Приведены результаты исследований смачивающей способности консервационных составов на основе отработанного моторного масла и отходов производства растительных масел. Для улучшения смачивающих свойств разработан ингибитор коррозии, обеспечивающий лучшую смачиваемость стальной поверхности и имеющий лучшую стойкость к смыванию осадками.

Ключевые слова: лесные машины, хранение, коррозия, консервационные составы, отходы производства рапсового масла, отработанное моторное масло.

**Vykov V.V., Golubev M.I. EFFICIENCY OF OIL WASTE NANOMATERIALS USED TO PROTECT FOREST STORED MACHINERY FROM CORROSION.**

The necessary anti-corrosion measures to be taken during forest machinery storage are being discussed. The results of research of preservatives wetting force, produced from used engine oil and oil production wastes, are shown. To improve the above wetting force, a corrosion-stopping agent, has been developed; it provides a better wetting force of steel surface and has better precipitation-resistant properties.

Key words: forestry machinery, storage, corrosion, preservative compositions, waste production of rapeseed oil, used motor oil.

**Гайдар С.М. ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ НАНОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ДОБАВОК В СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ ЛЕСНОГО КОМПЛЕКСА.**

За счет применения наноматериалов в качестве добавок в смазочные материалы можно добиться значительного увеличения ресурса работы машин и оборудования, а также снижения эксплуатационных затрат (в том числе расхода топлива), улучшения технических показателей (снижения шума и вибраций, вредных выбросов).

Ключевые слова: нанотехнологии, наноматериалы, молекулярные структуры, амфифильные молекулы.

**Gaidar S.M. APPLICATION PERSPECTIVES OF NANOTECHNOLOGY ADDITIVES IN LUBRICATING MATERIALS FOR MACHINERY AND EQUIPMENT OF THE TIMBERCOMPLEX.**

The significant increase of operational life of machinery and equipment as well as operational costs reduction (including fuel consumption), improvement of technical indicators (reduction of noise, vibrations and hazardous emissions) can be achieved due to nanomaterial application as additives in lubricants.

Key words: nanotechnology, nanomaterials, molecular structure, amphiphilic molecules.

**Гайдар С.М., Низамов Р.К., Голубев М.И. КОНЦЕПЦИЯ СОЗДАНИЯ ИНГИБИТОРОВ КОРРОЗИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАНОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ.**

Представлены теоретические исследования, позволяющие разработать концепцию создания и технологию органического синтеза базового химического соединения для средств защиты от коррозии и износа, разработать новые защитные средства и технологии их применения для повышения надежности сельскохозяйственной техники.

Ключевые слова: гетерогенная система, ингибитор коррозии, поверхностная энергия, адсорбция, поверхностно-активные молекулы.

**Gaidar S.M., Nizamov R.K., Golubev M.I. CONCEPT OF DEVELOPING CORROSION-STOPPING AGENTS BY USING NANOTECH APPROACHES.**

Theoretical research which enables to develop the concept and the technology of creating organic synthesis of basic compounds used in corrosion- and wear-stopping agents and to develop new protective means and their application technology to improve agricultural machinery reliability are presented.

Key words: heterogenic system, corrosion inhibiting factor, surface energy, adsorption, surface-active molecules.

**Козырев В.В., Козырева Л.В., Чупятков Н.Н. ПОЛИМЕРНЫЕ НАНОКОМПОЗИТЫ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТИРУЮЩИХ МАШИН.**

В статье представлены результаты исследования физико-механических и эксплуатационных свойств полимерных нанокompозитов, полученных с использованием CVD-метода металлоорганических соединений и углеводородов. Обоснована целесообразность использования полимерных нанокompозитов в процессах восстановления деталей подъемно-транспортных машин, эксплуатирующихся в контакте с абразивными и коррозионными средами.

Ключевые слова: полимерные нанокompозиты, восстановление деталей, CVD-метод, нанопленки, металлизация, углеродные нанотрубки, полиамид-66.

**Kosyrev V.V., Kosyreva L.V., Chupyatov N.N. POLYMER NANOCOMPOSITES IN PROCESSES OF RESTORATION OF HOISTING-CONVEYING MACHINE PARTS.**

The report presents the results of physical-mechanical and performance properties of polymer nanocomposites produced by using CVD-method of organometallic compounds and hydrocarbons. The expediency of using polymer nanocomposites in the process of restoration of parts of hoisting and conveying machinery, operating in contact with the abrasive and corrosive environments, is stated.

Key words: polymeric nanocomposites, restoration of details, a CVD-method, nanofilms, metallization, carbon nanotubes, polyamide-66.

**Сиротов А.В., Шамарин Ю.А., Панферов В.И., Селиванов К.В. К ВОПРОСУ ПРИМЕНЕНИЯ НАНОТЕХНОЛОГИЙ И НАНОМАТЕРИАЛОВ В ЛЕСНОМ МАШИНОСТРОЕНИИ.**

В статье рассматриваются вопросы применения нанотехнологий и наноматериалов в лесном машиностроении. Описаны принципы и способы применения и возможные пути развития. Представлен опыт применения нанотехнологий и экономический эффект от применения, накопленный различными странами. Приведены современные способы использования нанотехнологий и наноматериалов.

Ключевые слова: нанотехнологии, наноматериалы, машиностроение, микроизнос.

**Siroto A.V., Shamarin Y.A., Panferov V.I., Selivanov K.V. THE PROBLEM OF NANOTECHNOLOGY AND NANOMATERIALS APPLICATION IN THE FOREST MACHINERY MANUFACTURE.**

The article studies issues of using nanotechnologies and nanomaterials in forest machinery. The article describes main principles and means of using as well as possible ways of its developing. The article presents the foreign experience in applying nanotechnologies and nanomaterials as well as economical benefits from it. Further it gives modern ways of using nanotechnologies and nanomaterials.

Key words: Nanotechnologies, nanomaterials, machinery, micro wear.

**Завитаев Э.В., Русаков О.В., Юшканов А.А. ВЛИЯНИЕ СКИН-ЭФФЕКТА НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ТОКА ВНУТРИ СУБМИКРОННОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПРОВОЛОКИ.**

Впервые решена задача о влиянии скин-эффекта на распределение плотности тока внутри субмикронной цилиндрической проволоки. В качестве граничных условий задачи принято условие зеркально-диффузного отражения электронов от внутренней поверхности проволоки. Рассмотрены предельные случаи и проведен анализ полученных результатов.

Ключевые слова: скин-эффект, функция распределения, плотность тока.

**Zavitaev E.V., Rusakov O.V., Yushkanov A.A. THE INFLUENCE OF SKIN EFFECT ON CURRENT DENSITY DISTRIBUTION INSIDE A CYLINDRICAL SUB-MICRON WIRE.**

The problem of the influence of skin effect in submicron cylindrical wire has been solved for the first time ever. The boundary conditions of the problem are diffuse reflection of electrons from the inner surface of the wire. The limiting cases and the analysis of the results are presented.

Key words: skin-effect, distribution function, current density.

**Лесин Д.Н., Лесин Н.И. АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ФАР.**

Исследуется алгоритм определения технического состояния фазированных антенных решеток по результатам измерений поля в ближней зоне. Показано, что данный алгоритм позволяет оценивать техническое состояние фазированных антенных решеток с заданной точностью.

Ключевые слова: фазированная антенная решетка, алгоритм, регуляризация, техническое состояние, амплитуды и фазы поля, ближняя зона.

**Lesin D.N., Lesin N.I. ALGORITHM OF ASSESSMENT OF THE PHASED ARRAYS TECHNICAL CONDITION.**

Here is analysed the algorithm of assessment of the phased arrays technical condition by results of the field measurements in a near zone. It is proved that the given algorithm allows to assess technical condition of the phased arrays with given accuracy.

Key words: phased array, algorithm, regularization, technical condition, the amplitude and the phase of the field, near zone.

**Рыппо В.Л. МОДЕЛЬ ГОМЕОСТАТА НА ПОТОКАХ ЧАСТИЦ СЫПУЧЕЙ СРЕДЫ.**

Предложена конструкция гомеостата, состоящая из 5 и более отдельных элементов. Для решения задачи предлагается нейронная модель непланарной сети, в которой логические операции осуществляются потоками сыпучих сред субмикронных частиц.

Ключевые слова: гомеостат Эшби, планарная сеть, непланарная сеть, сыпучая среда.

**Ryppo V.L. MODEL OF HOMEOSTAT ON FLUXES OF GRANULAR MATERIAL.**

The construction of homeostate, which consists of 5 or more separate elements is proposed. It is offered to solve the problem using a neuron model of non-planar net, in which logical operations are provided by submicron particle streams.

Key words: Ashby's homeostat, planar net, non planar net, granular medium.

**Саврухин А.П. О ПОДОБИИ СТРУКТУР ЭЛЕМЕНТОВ МАКРО- И МИКРОМИРА.**

По мере совершенствования научных методов исследования природы ученые продвигаются все глубже в постижении тайн микромира. Найдено, что некоторые молекулы образуют замкнутые цепочки, молекулы ДНК имеют спиральную форму, соотношения элементов в сплавах гармоничны, молекулы углерода образуют сфероподобные фигуры с регулярной структурой – фуллерены. В настоящей статье автор доказывает, что наблюдающаяся гармоническая пропорциональность имеет исходный образец, шаблон. Этим образцом служат элементарные частицы.

Ключевые слова: золотое сечение, элементарные частицы, фуллерены, распады частиц, векторная энергетика

**Savrukhin A.P. ABOUT SIMILARITY OF STRUCTURES OF ELEMENTS MACRO- AND THE MICROCOSM.**

With the improvement of scientific methods in nature investigation, scientists are moving ever deeper into the comprehension of the mysteries of the microcosm. We have found that some of the molecules form a closed chain, the DNA molecules have a spiral shape, the ratio of elements in the alloys are harmonious, carbon molecules form sphere-like shape with a regular structure – fullerenes. In this article, the author argues that observed harmonic proportionality has a primary sample or a pattern. This pattern is the elementary particles.

Key words: gold section, elementary particles, fullerene, disintegrations of particles, vector power.

## **Усатов И.И. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ЗОНДОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕ.**

Свойства наноструктурных пленок, получаемых в разряде, существенно зависят от параметров плазмы. Измерение таких характеристик, как концентрация электронов, плавающий и плазменный потенциалы, температура электронов, функция их распределения по энергиям представляют актуальную задачу. В данной статье представлена автоматизированная система для измерения данных параметров. Рассмотрены аппаратная реализация и алгоритмы программного обеспечения.

Ключевые слова: наноструктурные пленки, плазменная технология, диагностика плазмы, зондовые измерения в плазме.

## **Usatov I.I. AN AUTOMATED SYSTEM FOR PROBE MEASUREMENT OF METAL PLASMA.**

Properties of nanostructured films produced in discharge greatly depend on plasma characteristics. The measuring of such parameters as a density, plasma and floating potentials, an electron temperature and energy distribution function are the actual task. The description of the automated system for measuring these characteristic is presented in this article. The software algorithms and hardware implementation of this system are described.

Key words: nanostructural films, plasma technology, diagnostics of plasma, probe measurements in the plasma.

## **Царьгородцев Ю.П., Полуэктов Н.П., Харченко В.Н., Усатов И.И. ПОЛУЧЕНИЕ НАНОСТРУКТУРНЫХ ПЛЕНОК В УСТАНОВКАХ ВЫСОКОПЛОТНОЙ ПЛАЗМЫ.**

Приведены результаты экспериментальных исследований по осаждению металлических наноструктурных пленок в установке СВЧ-ЭЦР разряда и магнетронного разряда с полым катодом. Высокая концентрация плазмы в этих установках ( $>10^{11}$  см<sup>-3</sup>), создаваемая в больших объемах ( $>5 \cdot 10^3$  см<sup>3</sup>), увеличивает вероятность ионизации распыленных атомов металла на пути от мишени к подложке. Получение пленок в таких установках стимулируется большими потоками ионов, что позволяет получать наноструктурные пленки с уникальными физическими свойствами (высокая адгезия, прочность, высокая теплопроводность). Кроме того, потоком ионов металла можно управлять электрическим полем вблизи подложки, что позволяет осажждать пленки на рельефных субмикронных структурах с большим отношением глубина (высота) к ширине.

Ключевые слова: плазма, СВЧ-ЭЦР разряд, магнетронный разряд с полым катодом, наноструктурные пленки.

## **Tsar'gorodsev Yu.P., Poluektov N.P., Kharchenko V.N., Usatov I.I. DEPOSITION OF NANOFILMS IN HIGH DENSITY PLASMA DEVICES.**

The results of experiments on depositing metal nano-structured films in a microwave ECR discharge and magnetron discharge with hollow cathode are presented. High plasma density in these devices ( $10^{11}$  cm<sup>-3</sup>) produced in large volumes ( $5 \cdot 10^3$  cm<sup>3</sup>) increases the possibility of ionization of sputtered metal atoms on the way from the target to the substrate. The deposition of the films in these devices is stimulated large flows of ions, which allows to obtain nanostructured films with unique physical properties (high adhesion strength, high thermal conductivity). In addition, the flow of metal ions can be controlled by an electric field near the substrate, which allows the film to deposit on submicron relief structures with a high ratio of depth (height) to width.

Key words: plasma, microwave ECR discharge, hollow cathode magnetron discharge, nanostructured films.

**Цыплаков В.В., Фокин С.В. О КОНСТРУКЦИИ ДРОССЕЛИРУЮЩЕ-ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНОГО КЛАПАНА.**

Приводится обоснование применения дросселирующе-предохранительного клапана, входящего в состав гидравлической системы машины для измельчения пней, оснащенной конической фрезой с жидкостным наполнителем. Предлагается способ измельчения пней с использованием компенсирующей силы привода и рассчитываются основные технологические параметры измельчения пней при помощи предлагаемого оборудования

Ключевые слова: нераскорчеванные вырубki, пни, гидросистема лесохозяйственных машин, дросселирующе-предохранительный клапан, коническая фреза.

**Tsyplakov V.V., Fokin S.V. ON THE CONSTRUCTION DROSSELIRUYUSCHE-RELIEF VALVE.**

The rationale for the use throttling-relief valve, a component of hydraulic machines for grinding stumps, equipped with a conical cutter with a liquid filler. Provides a method of grinding stumps with countervailing power drive and the main technological parameters are calculated grinding stumps with the proposed equipment.

Key words: non-uprooted stumps reforestation, tree stumps, hydraulic forestry machine, the throttling-relief valve, the conical cutter.