

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТЕРЬ РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ ИЗ ПОКРЫТИЯ КОНТАКТОРА ПРИ ХИМИЧЕСКОМ УХОДЕ ЗА ЛЕСНЫМИ КУЛЬТУРАМИ

А.А. Котов, А.Ф. Алябьев

МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 141005, Московская область, г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

kotov@mgul.ac.ru

Статья посвящена созданию модели потерь рабочей жидкости из покрытия рабочего органа машины для химического ухода за лесными культурами контактным способом на вырубках. Изучены силы, оказывающие воздействие на рабочий орган, реализованный в виде вращающегося барабана. При определении потерь ударные нагрузки имитировались центробежными силами. Материал покрытия барабана, представляющий собой сложную капиллярную систему, имитировался эквивалентными капиллярами. Течение жидкости в отдельном капилляре описано уравнением динамики тела переменной массы. Разработанная модель потерь жидкости позволяет определять параметры и режимы работы машины с точки зрения экологической безопасности.

**Ключевые слова:** химический уход, математическая модель, контактор, рабочая жидкость, экология

**Ссылка для цитирования:** Котов А.А., Алябьев А.Ф. Моделирование потерь рабочей жидкости из покрытия контактора при химическом уходе за лесными культурами // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2019. Т. 23. № 2. С. 141–146. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-2-141-146

В процессе анализа литературы, описывающей машины контактного типа, а также полевых испытаний опытных образцов выяснено, что рабочий орган машины для ухода за лесными культурами на вырубках должен представлять собой вращающийся барабан с пористым покрытием [1–13]. При эксплуатации машины на рабочий орган воздействуют силы реакции обрабатываемых растений, ударные нагрузки о препятствия (пни, порубочные остатки, неровности почвы), вибрация трактора, дисбаланс барабана [14, 15]. Перечисленные силы передаются на частицы жидкого препарата, заполняющего открытые поры покрытия. Кроме них на частицу жидкости влияют центробежная сила при вращении барабана, сила тяжести, силы поверхностного натяжения и сопротивления движению (трение).

### Цель работы

Поставлена задача создания модели потерь рабочей жидкости из покрытия рабочего органа машины для химического ухода за лесными культурами контактным способом на вырубках.

### Методы решения задачи и принятые допущения

Условно выделим из этих сил удерживающие и вырывающие [14]. Соотношение последних оказывает влияние на потери препарата из покрытия контактора, т. е. на степень загрязнения окружающей среды.

В общем случае систему сил, действующих на частицу рабочей жидкости в материале покрытия, можно представить так:

$$\vec{F} = \vec{F}_{\text{виб}} + \vec{F}_y + \vec{G} + \vec{F}_{\text{дб}} + \vec{F}_{\text{ц}} + \vec{F}_k + \vec{F}_c + \vec{F}_n,$$

где  $F$  — сила инерции при движении жидкости по капиллярам;  $F_{\text{виб}}$  и  $F_y$  — соответственно силы вибрации и удара [15, 16];  $G$  — сила тяжести;  $F_{\text{дб}}$  — сила от дисбаланса барабана;  $F_{\text{ц}}$  — центробежная сила;  $F_k$  — сила Кориолиса;  $F_c$  — сила сопротивления движению;  $F_n$  — сила поверхностного натяжения.

Исследуем действие указанных сил в трех точках поверхности барабана: сверху, сбоку и внизу. Очевидно, наиболее опасной с точки зрения потерь является нижняя точка, так как на практике жидкость теряется из нижней части барабана. В зависимости от угла поворота барабана с  $i$ -й частицей жидкости в его покрытии эти силы могут являться для нее как удерживающими, так и вырывающими, или быть нейтральными. К удерживающим постоянно относятся силы поверхностного натяжения, сопротивления движению, силы инерции.

При невозможности теоретического определения ударных сил будем имитировать их центробежными. Наибольшее центростремительное ускорение примем равным 20 g из расчета, что скорость машины на вырубке не превышает 3–7 км/ч, а длительность соударения  $t$  составляет 0,01–0,1 с. Получаем, что ускорение  $a = 10\text{--}200 \text{ м/с}^2$  [15].

Материал покрытия контактора представляет собой сложную капиллярную систему. Известно, что время и интенсивность потерь жидкости зависят от радиуса капилляров материала [17].

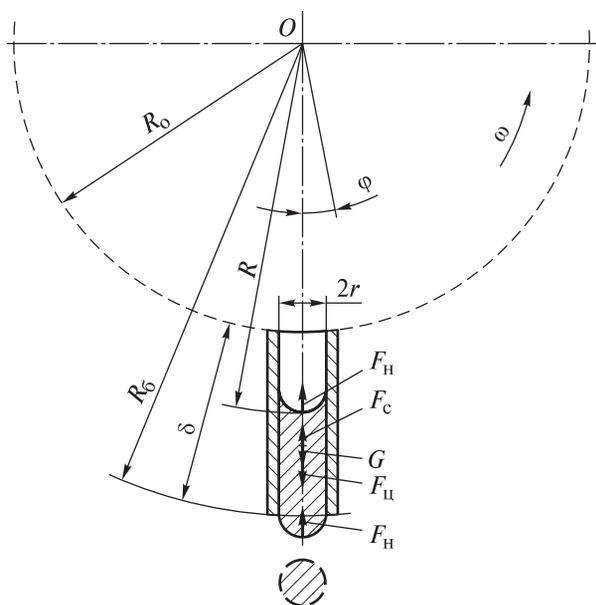


Рис. 1. К расчету сил, действующих на столб жидкости в капилляре

Fig. 1. To the calculation of forces acting on the liquid column in the capillary

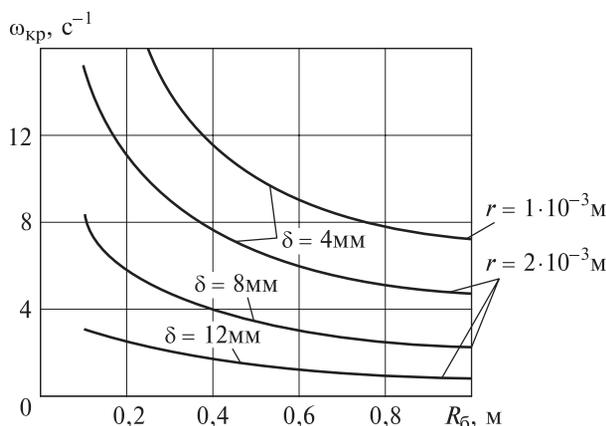


Рис. 2. Изменение критической угловой скорости

Поэтому из всех свойств материала определяющее значение имеют радиусы эквивалентных капилляров материала в радиальном направлении по отношению к барабану и функция распределения количества капилляров по их радиусам.

Под эквивалентным капилляром будем понимать капилляр постоянного радиуса, движение жидкости по которому и по капилляру переменного сечения имеет одинаковую продолжительность. Представив материал рабочей поверхности пучком обособленных друг от друга параллельных цилиндрических капилляров, рассмотрим силы в произвольном капилляре с жидкостью, подверженной действию центробежных сил (рис. 1).

Под влиянием силы тяжести и центробежной силы столб жидкости начинает перемещаться, меняя на концах капилляра знак кривизны по-

верхности [17]. В итоге на выходе из капилляра образуется капля, которая при некоторой величине критической массы отрывается от капилляра. Таким образом, масса жидкого пестицида, движущегося в капилляре, переменна.

Применяемые на производстве водные растворы пестицида с концентрацией 1–10 % близки по свойствам воде [7]. По вязкости и коэффициенту поверхностного натяжения вода уступает рабочей жидкости, что способствует получению заведомо завышенных потерь, т. е. повышает экологические качества машины. Поэтому принимаем воду в качестве жидкости. Физические свойства воды принимаем при температуре 20 °С [18–21]. Анализ выполняем, считая, что эти свойства не зависят от температуры.

### Исходные и конечные математические выражения

Для описания передвижения жидкости в отдельном капилляре применяем уравнение динамики тела переменной массы [16]:

$$F = \frac{d(mV)}{dt} = m \frac{dV}{dt} + V \frac{dm}{dt}, \quad (1)$$

где  $F$  — сумма сил, действующих на столб жидкости;  $V$  — скорость движения жидкости вдоль оси капилляра;  $m$  — масса столба жидкости в капилляре.

Заменив  $m$  и  $V$  в выражении (1), получим

$$F = \rho_{ж} \pi r^2 \left[ - \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 + (R_0 - R) \frac{d^2 R}{dt^2} \right], \quad (2)$$

где  $r$  — радиус капилляра;  $R_0$  — радиус барабана;  $R$  — расстояние от оси барабана до ближайшего к оси вращения мениска жидкости.

Считая столб жидкости в капилляре неразрывным, её движение — ламинарным, вход воздуха в освободившееся от жидкости пространство снаружи, и пренебрегая силами Кориолиса, определим силы, оказывающие воздействие на столб жидкости. Это силы тяжести, поверхностного натяжения, сопротивления движению жидкости, центробежная сила [14, 18–20].

Сумма сил, воздействующих на столб жидкости в капилляре, в общем случае будет равна

$$\vec{F} = \vec{F}_ц + 2\vec{F}_н + \vec{F}_\sigma + \vec{G}(t).$$

Выделим перемещение жидкости в каждом капилляре в виде трех последовательных стадий.

1. Барабан не вращается (угловая скорость равна нулю), столб жидкости не движется по капилляру и сумма всех сил равна нулю. На основании этого имеем

$$\rho_{ж} g r (R_0 - R) - 4\sigma \cos \theta = 0. \quad (3)$$

2. Угловая скорость вращения барабана  $\omega$  меньше критической  $\omega_{кр}$ , столб жидкости не движется и сумма всех сил равна нулю. Аналогично получим

$$g(R_0 - R)\cos(\omega t) + \omega^2 \frac{R_0^2 - R^2}{2} - \frac{4\sigma \cos\theta}{\rho_{ж} r} = 0. \quad (4)$$

3. Угловая скорость вращения контактора  $\omega$  больше критической  $\omega_{кр}$ , столб жидкости перемещается в капилляре, происходит отрыв капель на его конце, и движение столба описывает уравнение динамики переменной массы. Тогда

$$\begin{aligned} (R_0 - R) \frac{d^2 R}{dt^2} - \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 - \omega^2 \frac{R_0^2 - R^2}{2} - \\ - g(R_0 - R)\cos(\omega t) + \\ + \frac{4\sigma \cos\theta}{\rho_{ж} r} + \frac{8\mu}{\rho_{ж} r^2} (R_0 - R) \frac{dR}{dt} = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Таким образом, динамику столба жидкости в капилляре под влиянием гравитационной и центробежной сил можно описать системой уравнений (3)–(5).

Для решения этой системы необходимо знать радиус эквивалентного капилляра и предварительно задаться значениями  $\omega$ ,  $R_0$ ,  $r$ . Из выражения (3) выразим

$$r = \frac{4\sigma \cos\theta}{\rho_{ж} g (R_0 - R)} \quad \text{или} \quad r = \frac{4\sigma \cos\theta}{\rho_{ж} g l}, \quad (6)$$

где  $l$  — высота столба жидкости в капилляре.

Заменяя в уравнении (6)  $l$  на толщину покрытия  $\delta$ , находим максимальное значение радиуса капилляра, наполненного полностью жидкостью в статике

$$r_{\max} = \frac{4\sigma \cos\theta}{\rho_{ж} g \delta}. \quad (7)$$

Эта величина будет границей; капилляры с радиусом выше  $r_{\max}$  будут обезвожены при  $\omega = 0$ .

Из выражения (4) при  $t = 0$ , приняв  $R$  равным

$$R_0 \text{ и заменив } \omega^2 \frac{R_0^2 + R_0^2}{2} = a_n, \text{ получим}$$

$$r_{\max} = \frac{4\sigma \cos\theta}{\rho_{ж} \delta (g + a_n)}. \quad (8)$$

Уравнением (8) определяется значение наибольшего радиуса капилляра, наполненного жидкостью при произвольном центробежном ускорении  $a_n$ . Из выражения следует, что значение радиуса капилляра, наполненного жидкостью, обратно пропорционально толщине рабочего покрытия  $\delta$  и суммарному ускорению  $a = g + a_n$ .

Определим граничную угловую скорость  $\omega_{кр}$ , соответствующую отсутствию потерь и полному

заполнению ею капилляров с радиусом  $r < r_{\max}$ , из выражения (4)

$$\omega_{кр} \leq \sqrt{\frac{2 \left( \frac{4\sigma \cos\theta}{\rho_{ж} r} - g\delta \right)}{\delta(2R_0 - \delta)}}. \quad (9)$$

Здесь приняты худшие условия:  $G(t) = G$ . Выражение (9) показывает, что  $\omega_{кр}$  растет при увеличении  $\sigma$  и уменьшении  $\rho_{ж}$ ,  $r$ ,  $R_0$  и  $\delta$ .

При помощи этого неравенства была рассчитана граничная угловая скорость рабочего органа как функция от  $R_0$ ,  $\delta$  и  $r$ . Расчеты подтверждены графиком (рис. 2). Он показывает, что при  $r = 0,002$  м и  $R_0 = 0,1$  м угловая скорость для толщины покрытия, составляющей 0,004; 0,008 и 0,012 м, соответственно равна 15,16; 8,14 и 3,22  $\text{с}^{-1}$ . При  $R_0 = 1,0$  м и аналогичных остальных параметрах  $\omega_{кр}$  соответственно равна 4,75; 2,53 и 0,99  $\text{с}^{-1}$ .

Преобразовав уравнение (4) и выделив  $R$ , получаем, исходя из физического смысла процесса, следующее неравенство

$$\begin{aligned} R \leq - \frac{g}{\omega^2} + \\ + \sqrt{R_0^2 - \frac{8 \cdot \sigma \cdot \cos\theta - 2 \cdot R_0 \cdot g \cdot \rho_{ж} \cdot r}{\omega^2 \cdot \rho_{ж} \cdot r} + \frac{g^2}{\omega^4}}. \end{aligned} \quad (10)$$

Очевидно, что при  $\omega \rightarrow \infty$  за конечное время  $R \rightarrow R_0$ , капилляры в материале покрытия не теряют полностью жидкость, а оставшаяся ее часть концентрируется у наружной поверхности покрытия.

На основании неравенства (10) также построены кривые, показывающие положение мениска жидкости в капилляре материала покрытия барабана в зависимости от  $R_0$ ,  $\omega$  и  $r$ . Они изображены на рис. 3. Графики показывают, что при постоянной угловой скорости ( $\omega = \text{const}$ ) находящийся ближе к оси вращения мениск столба жидкости останавливается в строго определенном месте капилляра. Так при  $r$ , равном 0,1; 1,0; 3,0 и 5,0 мм,  $R_i$  соответственно составляет 148,3; 149,8; 149,94 и 149,97 мм ( $\omega = 100 \text{ с}^{-1}$ ,  $R_0 = 0,15$  м).

Следует отметить, что выражение (9) приближенно определяет потери жидкости из материала в предположении, что капилляры с радиусом  $r > r_{\max}$  совсем не имеют жидкости. Для более точного определения потерь нужно знать объем удаленной жидкости в капиллярах радиуса  $r > r_{\max}$ . Это позволяет сделать неравенство (10), с помощью которого в статике можно найти координаты наиболее близко расположенного к оси вращения мениска жидкости в капилляре.

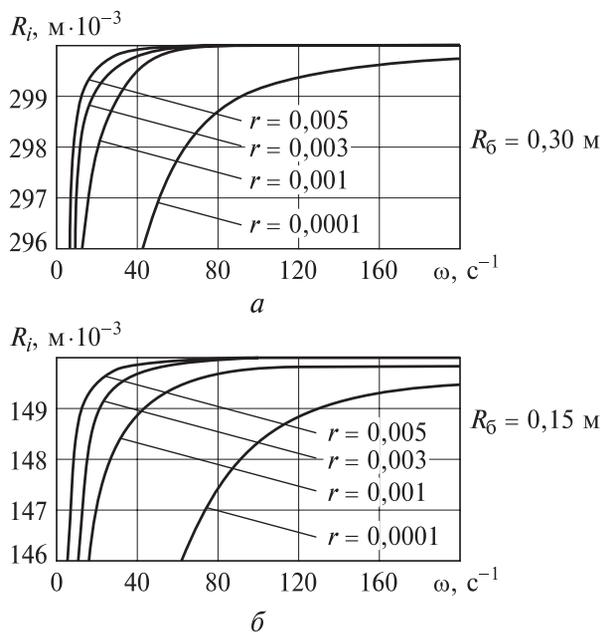


Рис. 3. Изменение положения мениска жидкости в капилляре  
Fig. 3. Change in critical angular velocity

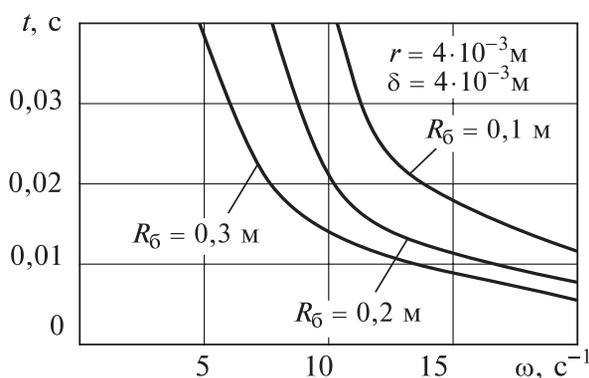


Рис. 4. Зависимость продолжительности движения мениска жидкости в капилляре от угловой скорости  
Fig. 4. The dependence of the duration of the meniscus fluid movement in the capillary on the angular velocity

Неравенство (10) также можно вывести из уравнения (5) при прекращении движения столба жидкости в капилляре, т. е. при  $dR/dt = 0$ , когда  $t \rightarrow \infty$ .

При изучении потерь жидкого пестицида из покрытия контактора в произвольное время  $t$  используем выражение (5). Решение его выполним относительно  $t$  методом Рунге-Кутты [14, 22, 23]. Для этого специально была разработана компьютерная программа. Принятыми начальными условиями являлись:  $R_0 = R_с - \delta$  и  $V = dR/dt = 0$  при  $t = 0$ .

В результате решения дифференциального уравнения установлено, что промежуток времени, при котором происходит потеря капилляром жидкости не превышает 0,1 с ( $r = 0,001-4,000$  мм,  $\delta = 4-12$  мм,  $\omega = 0-100$  с<sup>-1</sup> и  $R_с = 0,1-1,0$  м),

что соизмеримо с продолжительностью соударения барабана о препятствие [10]. Фрагмент решения этого уравнения движения жидкости в капилляре при различном его радиусе как функция угловой скорости представлен на рис. 4.

### Выводы

В результате выполненного теоретического анализа выявлено, что на возможные потери жидкого пестицида из поверхности рабочего органа влияют свойства рабочей жидкости, расположение пор материала покрытия и их размеры, толщина покрытия, а также радиус и угловая скорость вращения контактора. Составленная математическая модель позволяет найти радиус эквивалентного капилляра, наполненного жидкостью в статике и динамике без отрыва капель и с их отрывом, критическую (граничную) угловую скорость или координаты наиболее близких к оси вращения менисков жидкости. Модель дает возможность установить конструктивные и кинематические параметры контактора и технологические режимы работы машины, не приводящие к потерям пестицида, т. е. обеспечивающие охрану окружающей среды. Для подтверждения теоретических выводов необходимо проведение экспериментальных исследований свойств материала покрытия и параметров рабочего органа.

### Список литературы

- [1] Messersmith C.G., Lym R.G. Roller application of picloram for leafy spurge control in pastures // Weed Science, 1985, v. 33, no. 2, pp. 258–262.
- [2] Biniak B.M., Aldrich R.J. Reducing velvetleaf and giant foxtail seed production with simulated-roller herbicide application // Weed Science, 1986, v. 34, no. 2, pp. 256–259.
- [3] Waddington J., Bittmans S. Control of brush regrowth in northeastern Saskatchewan by several concentrations of herbicides applied with a roller // Canad. J. Plant Sc., 1987, v. 67, no. 2, pp. 467–475.
- [4] Welker W.V., Peterson D.L. A rotary herbicide wiper for post emergence weed control in perennial horticultural crops // Weed Technology, 1987, v. 1, no. 4, pp. 319–322.
- [5] Gaultney L.D. Fluid retention on a herbicide roller-wiper due to liquid surface tension and viscosity // ASAE, St Joseph, Mich., 1988, v. 31, no. 3, pp. 648–651.
- [6] Ченцов В.В., Аленичкова Т.Ф., Кузькина Т.И. Новые перспективные способы и средства механизации защиты растений: обзорн. информ. Вып. 6. М.: ЦНИИТЭИ-тракторосельхозмаш, 1988. 53 с.
- [7] Шутов И.В. Применение гербицидов и арборицидов в лесовыращивании. М.: Агропромиздат, 1989. 223 с.
- [8] Львов С.И., Пуятин Ю.П., Шашова М.В. Контактный способ нанесения гербицидов и арборицидов // Лесное хозяйство, 1990. № 12. С. 43–45.
- [9] Шершабов И.В. Контактное устройство для применения гербицидов // Защита растений. 1990. № 3. С. 36–37.
- [10] Винокуров В.Н., Котов А.А., Пельтек В.В. Машина для химического ухода за культурами // Охрана лесных экосистем и рациональное использование лесных ресурсов: сб. докл. II Всесоюзной научно-техн. конференции, Москва, МЛТИ, 15–17 октября 1991 г. М.: МЛТИ, 1991. Ч. 2. С. 195–196.

- [11] Котов А.А. Исследование экологической безопасности машины для химухода за лесными культурами контактным способом // Результаты фундаментальных исследований по приоритетным научным направлениям лесного комплекса страны: сб. научн. тр. Вып. 254. М.: МГУЛ, 1993. С. 38–42.
- [12] Котов А.А. Эффективность контактного способа внесения арборицидов при уходе за культурами // Лесное хозяйство, 1993. № 5. С. 48–49.
- [13] Алябьев А.Ф., Калинин С.Ю., Котов А.А. Исследование взаимодействия гусеницы трактора с почвой // Техника и оборудование для села, 2017. № 6. С. 18–21.
- [14] Котов А.А. Оптимизация режимов работы машины для химического ухода за лесными культурами контактным способом // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика, 2014. Т. 2. № 2–2 (7–2). С. 73–77.
- [15] Пановко Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара. Л.: Машиностроение, 1976. 320 с.
- [16] Добронравов В.В., Никитин Н.Н. Курс теоретической механики. М.: Высш. школа, 1983. 575 с.
- [17] Клевицкий М.М. Исследование центробежного способа обезвоживания круглых березовых лесоматериалов: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М.: МЛПИ, 1980. 19 с.
- [18] Бэтчелер Дж. Введение в динамику жидкости: пер. с англ. / под ред. Г.Ю. Степанова. М.: Мир, 1973. 760 с.
- [19] Калицун В.И., Дроздов Е.В. Основы гидравлики и аэродинамики. М.: Стройиздат, 1990. 247 с.
- [20] Скобелицын Ю.А. Истечение жидкостей через насадки, отверстия, распылители, водовыпуски, капельницы. Краснодар: КСХИ, 1989. 120 с.
- [21] Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1973. 832 с.
- [22] Котов А.А. Совершенствование технологий и создание средств механизации для химического ухода в лесных питомниках и культурах. М.: МГУЛ, 2008. 314 с.

## Сведения об авторах

**Котов Алексей Александрович** — д-р техн. наук, профессор кафедры ЛТ-1, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), kotov@mgul.ac.ru

**Алябьев Алексей Федорович** — д-р техн. наук, профессор кафедры ЛТ-7, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), alyabievaf@rambler.ru

Поступила в редакцию 25.12.2018.

Принята к публикации 15.02.2019.

## MODELING LOSSES OF WORKING FLUID FROM COVER OF CONTACTOR IN CHEMICAL CARE OF FOREST CROPS

**A.A. Kotov, A.F. Alyabiev**

BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

kotov@mgul.ac.ru

The article is devoted to the creation of a model of loss of working fluid from the coating of the working body of the machine for chemical care of forest crops by contact method on cutting down. The forces acting on the working body, made in the form of a rotating drum, are considered. Shock forces in the study of losses were simulated centrifugal. The drum coating material, represented by a complex capillary system, was simulated by equivalent capillaries. The movement of fluid in a separate capillary is described by the equation of body dynamics of a variable mass. The resulting fluid loss model allows you to determine the parameters and modes of operation of the machine from the point of view of environmental safety

**Keywords:** chemical treatment, mathematical model, contactor, working fluid, ecology

**Suggested citation:** Kotov A.A., Alyabiev A.F. *Modelirovanie poter' rabochey zhidkosti iz pokrytiya kontaktora pri khimicheskoy ukhode za lesnymi kul'turami* [Modeling losses of working fluid from cover of contactor in chemical care of forest crops]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2019, vol. 23, no. 2, pp. 141–146. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-2-141-146

## References

- [1] Messersmith C.G., Lym R.G. Roller application of picloram for leafy spurge control in pastures. *Weed Science*, 1985, v. 33, no. 2, pp. 258–262.
- [2] Biniak B.M., Aldrich R.J. Reducing velvetleaf and giant foxtail seed production with simulated-roller herbicide application. *Weed Science*, 1986, v. 34, no. 2, pp. 256–259.
- [3] Waddington J., Bittmans S. Control of brush regrowth in northeastern Saskatchewan by several concentrations of herbicides applied with a roller. *Canad. J. Plant Sc.*, 1987, v. 67, no. 2, pp. 467–475.
- [4] Welker W.V., Peterson D.L. A rotary herbicide wiper for post emergence weed control in perennial horticultural crops. *Weed Technology*, 1987, v. 1, no. 4, pp. 319–322.
- [5] Gaultney L.D. Fluid retention on a herbicide roller-wiper due to liquid surface tension and viscosity. *ASAE*, St Joseph, Mich., 1988, v. 31, no. 3, pp. 648–651.

- [6] Chentsov V.V., Alenchikova T.F., Kuz'kina T.I. *Novye perspektivnye sposoby i sredstva mekhanizatsii zashchity rasteniy: obzorn. inform* [Promising new ways and means of mechanization of plant protection: overview]. Moscow: TsNIITEItraktorosel'khoz mash, 1988, v. 6, 53 p.
- [7] Shutov I.V. *Primeneniye gerbitsidov i arboritsidov v lesovyvrashchivanii* [The use of herbicides and arboritsidy when growing forests]. Moscow: Agropromizdat, 1989, 223 p.
- [8] L'vov S.I., Putyatin Yu.P., Shashova M.V. *Kontaktnyy sposob naneseniya gerbitsidov i arboritsidov* [Contact method of applying herbicides and arboricides]. *Lesnoe khozyaystvo* [Forestry], 1990, no. 12, pp. 43–45.
- [9] Shershabov I.V. *Kontaktnoe ustroystvo dlya primeneniya gerbitsidov* [The contact device for the application of herbicides]. *Zashchita rasteniy* [Plant protection], 1990, no. 3, pp. 36–37.
- [10] Vinokurov V.N., Kotov A.A., Pel'tek V.V. *Mashina dlya khimicheskogo ukhoda za kul'turami* [Machine for chemical care of forest crops]. *Okhrana lesnykh ekosistem i ratsional'noe ispol'zovanie lesnykh resursov: sb. dokl. II Vsesoyuznoy nauchno-tekhn. konferentsii*. [Protection of forest ecosystems and rational use of forest resources: collection of reports of the II All-Union scientific and technical conference] Moscow, MLTI, October 5–17, 1991. Moscow: MLTI, 1991, vol. 2, pp. 195–196.
- [11] Kotov A.A. *Issledovanie ekologicheskoy bezopasnosti mashiny dlya khimicheskogo ukhoda za lesnymi kul'turami kontaktnym sposobom* [The study of ecological safety of machines for chemical care for forest plantations, contact]. *Rezul'taty fundamental'nykh issledovaniy po prioritetyim nauchnym napravleniyam lesnogo kompleksa strany: sb. nauchn. tr.* [The results of fundamental research in the priority research areas of the forest complex of the country: Collected papers]. Moscow: MGUL, 1993, v. 254, pp. 38–42.
- [12] Kotov A.A. *Effektivnost' kontaktnogo sposoba vnesheniya arboritsidov pri ukhode za kul'turami* [The efficiency of the contact way of making arboricides care cultures]. *Lesnoe khozyaystvo* [Forestry], 1993, no. 5, pp. 48–49.
- [13] Alyabyev A.F., Kalinin S.Y., Kotov A.A. *Issledovaniye vzaimodeystviya gusenitsy traktora s pochvoy* [Investigation of the interaction of the tractor caterpillar with the soil]. *Tekhnika i oborudovaniye dlya sela* [Technique and equipment for the village], 2017, no. 6, pp. 18–21.
- [14] Kotov A.A. *Optimizatsiya rezhimov raboty mashiny dlya khimicheskogo ukhoda za lesnymi kul'turami kontaktnym sposobom* [Optimization of machine operation modes for chemical care of forest cultures by the contact method]. *Aktual'nyye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Actual areas of research of the XXI century: theory and practice], 2014, v. 2, no. 2–2 (7–2), pp. 73–77.
- [15] Panovko Ya.G. *Osnovy prikladnoy teorii kolebaniy i udara* [Fundamentals of applied theory of vibrations and shock]. *Leninograd: Mashinostroenie* [Engineering], 1976, 320 p.
- [16] Dobronravov V.V., Nikitin N.N. *Kurs teoreticheskoy mekhaniki*. [The course of theoretical mechanics]. Moscow: Vysshaya shkola [High School], 1983, 575 p.
- [17] Klevitskiy M.M. *Issledovanie tsentrobezhnogo sposoba obezvozhivaniya kruglykh berezovykh lesomaterialov: avtoref. diss. ...kand. tekhn. nauk* [Investigation of the method of centrifugal dewatering of round birch: Author. Dis. ... Cand. Sci. (Tech.)]. Moscow: MLTI, 1980, 19 p.
- [18] Batchelor J. *Vvedeniye v dinamiku zhidkosti* [Introduction to fluid dynamics]. Moscow: Mir, 1973, 760 p.
- [19] Kalicun V.I., Drozdov E.V. *Osnovy gidravliki i ajerodinamiki* [Fundamentals of hydraulics and aerodynamics]. Moscow: Stroyizdat Publ., 1990, 247 p.
- [20] Skobelitsyn Yu.A. *Istecheniye zhidkostey cherez nasadki, otverstiya, raspyliteli, vodovypuski, kapel'nitsy* [The outflow of fluids through nozzles, holes, sprays, water outlets, droppers]. Krasnodar: KSKhI, 1989, 120 p.
- [21] Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematikedlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* [Mathematics Handbook for Scientists and Engineers]. Moscow: Nauka [Science], 1973, 832 p.
- [22] Kotov A.A. *Sovershenstvovanie tehnologiy i sozdanie sredstv mekhanizatsii dlya himicheskogo ukhoda v lesnykh pitomnikah i kul'turakh* [Perfection of technologies and creation of means of mechanization for chemical care in forest farm and cultures]. Moscow, MGUL, 2008, 314 p.

## Authors' information

**Kotov Alexey Aleksandrovich** — Dr. Sci. (Tech.), Professor BMSTU (Mytishchi branch),  
kotov@mgul.ac.ru

**Alyabiev Alexey Fedorovich** — Dr. Sci. (Tech.), Professor BMSTU (Mytishchi branch),  
alyabievaf@rambler.ru

Received 25.12.2018.

Accepted for publication 15.02.2019.