

ИССЛЕДОВАНИЕ РАВНОМЕРНОГО ДВИЖЕНИЯ ОТКРЫТОГО БАРЖЕВОГО МОДУЛЯ

С.В. Посыпанов, А.В. Коробицын

ФГАОУ ВПО «Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова»
163002, г. Архангельск, наб. Сев. Двины, 17

s.posypanov@narfu.ru

При недостатке дорог в основных лесных регионах РФ обеспечить экономическую доступность значительной доли древесного сырья можно только при использовании развитой сети средних и малых рек. Одним из экологически щадящих и экономичных способов транспортировки лесоматериалов по воде являются судовые перевозки. Однако возможности применения обычных судов на средних и малых реках весьма ограничены. Рассматриваемые в статье открытые баржевые модули (ОБМ) являются альтернативой этим судам на таких реках. Из ОБМ предполагается формирование баржевых составов, размеры которых определяются количеством установленных в них модулей и диктуются путевыми условиями конкретных рек в данный период. Использование ОБМ обеспечивает возможности транспортировки лесоматериалов недостаточной плавучести, уменьшение осадки лесотранспортных единиц. Для выполнения инженерных расчетов, связанных с проектированием и эксплуатацией ОБМ, нужны сведения о сопротивлении воды движению этих устройств, в частности равномерному. Опираясь на положения гидромеханики, авторы установили первичные факторы, определяющие силу сопротивления воды равномерному движению ОБМ. Представлено символическое решение задачи в критериальной форме. Обоснована возможность исключения числа Рейнольдса из перечня определяющих факторов. Итоговое символическое решение записано как зависимость коэффициента сопротивления воды равномерному движению ОБМ от числа Фруда, а также ширины и длины модуля, отнесенных к его осадке. Для получения этой зависимости в явном виде проведены эксперименты на моделях. По результатам экспериментов для указанного коэффициента получена регрессионная модель. Использование ее совместно с формулой Ньютона позволяет определять силу сопротивления воды равномерному движению ОБМ. В результате анализа модели установлено, что увеличение скорости движения ОБМ и длины модуля, отнесенной к его осадке, в пределах принятых диапазонов варьирования приводит к небольшому возрастанию коэффициента сопротивления соответственно на 3...11 и 7...15 %. Наибольшее влияние на коэффициент оказывает ширина модуля, отнесенная к осадке. Изменение относительной ширины модуля в пределах принятого диапазона приводит к увеличению коэффициента сопротивления на 50...60 %.

Ключевые слова: транспорт лесоматериалов, открытый баржевой модуль, сопротивление воды, равномерное движение

Ссылка для цитирования: Посыпанов С.В., Коробицын А.В. Исследование равномерного движения открытого баржевого модуля // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 1. С. 95–100. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-95-100

В основных лесных регионах России при значительном недостатке автомобильных и железных дорог обеспечить экономическую доступность большой доли древесного сырья зачастую возможно только при использовании хорошо развитой речной сети, основу которой составляют средние и малые реки. После прекращения молевого сплава реки для транспортировки леса используют весьма незначительно. В настоящее время речные перевозки лесоматериалов допустимы непосредственно по воде только в пакетированном виде либо на судах. Эти способы имеют свои достоинства и недостатки; при этом они являются выигрышными как в экономическом, так и в экологическом плане по сравнению с сухопутными перевозками [1]. Размеры судов для транспортировки лесоматериалов (чаще всего это баржи) таковы, что их использование на средних реках возможно, как правило, только в течение сравнительно короткого периода весеннего половодья. Малые реки для них практически закрыты. Для средних и малых рек

предложена новая лесотранспортная единица — открытый баржевой модуль (ОБМ). Из таких модулей предполагается формировать баржевые составы, размеры которых определяются количеством установленных в них по длине и по ширине ОБМ и диктуются путевыми условиями конкретных рек в данный период. Этот модуль назван открытым, потому что он, в отличие от жесткого плавучего контейнера [2], также называемого баржевым модулем, не имеет герметичной обшивки. Предложенное устройство (рис. 1) представляет собой пару поплавков, соединенных между собой и снабженных вертикальными стойками. Стойки имеют стопоры для гибких связей, которые позволяют фиксировать круглые лесоматериалы в устройстве. ОБМ обеспечивают возможность транспортировки лесоматериалов недостаточной плавучести (лиственных, тонкомерных) по водным путям, наличие у них поплавков способствует уменьшению осадки. Более подробные сведения о конструкции ОБМ и технологических аспектах, связанных с их ис-

пользованием, можно получить из источников [3, 4].

Для выполнения инженерных расчетов, связанных с эксплуатацией ОБМ, нужна информация о сопротивлении воды перемещению этих устройств. На первом этапе логично рассмотреть равномерное движение. Исследованиям равномерного движения твердых тел в жидкости посвящено довольно много работ. Большой вклад в развитие этой отрасли знаний внесли исследователи, занимавшиеся изучением движения судов. Их труды (например, такие как [5–11]) послужили основой при проведении подобных исследований с лесотранспортными единицами. Из указанных единиц больше всего внимания уделялось плотам. Применительно к рассматриваемому случаю наибольший интерес представляют исследования В.П. Корпачева [6], связанные с равномерным движением в воде лесосплавных пучков. Заметим, что при наличии некоторых аналогий ОБМ, загруженный круглыми лесоматериалами, все же существенно отличается от лесосплавного пучка. ОБМ имеет выступающие вертикальные стойки и горизонтальные балки основания, а также отличную от лесосплавного пучка форму поперечного сечения загруженной пачки круглых лесоматериалов. Указанные отличия предполагают и отличия в сопротивлении воды равномерному движению сравниваемых лесотранспортных единиц. На основании изложенного было принято решение о выполнении данной работы. Формула для рас-

чета сопротивления воды равномерному движению твердого тела известна [7]. Задача в таких случаях сводится к определению коэффициента этого сопротивления.

Материалы и методы исследования

Цель работы — получение математической модели для определения коэффициента сопротивления воды равномерному движению ОБМ, установление характера и степени влияния определяющих факторов на величину этого коэффициента.

Метод исследования — экспериментально-теоретический.

Согласно положениям гидромеханики [7], величина силы R сопротивления жидкости равномерному движению находящегося на плаву твердого тела зависит от размеров и формы его погруженной в жидкость части, направления движения, вязкости и плотности жидкости, характеристики поля гравитационных сил и скорости буксировки. Существенная геометрическая ограниченность потока также оказывает влияние на величину упомянутой силы. Однако на данном этапе исследований рассматриваются случаи, когда это влияние незначительно. Форму и размеры подводной части ОБМ можно охарактеризовать его осадкой T и двумя безразмерными параметрами — длиной и шириной, отнесенными к осадке, — соответственно B/T и L/T . Тогда символическое решение задачи можно записать следующим образом

$$R = f(\rho; \mu; g; v; T; B/T; L/T), \quad (1)$$

где ρ — плотность воды, кг/м³;

μ — динамический коэффициент вязкости воды, Па · с;

g — характеристика поля гравитационных сил, м/с²;

v — скорость перемещения ОБМ относительно воды, м/с.

Представим решение в критериальной форме. Согласно первой теореме подобия [8], приведем зависимость (1) к безразмерному виду. Выполним с учетом положений теории размерностей и подобия ряд преобразований, получим

$$\frac{R}{\rho v^2 T^2} = \Phi \left(1; \frac{\mu}{\rho v T}; 1; \frac{gT}{v^2}; 1; \frac{B}{T}; \frac{L}{T} \right). \quad (2)$$

Умножим левую и правую части выражения (2) на $2T/B$

$$\frac{R}{0,5\rho v^2 BT} = \frac{2T}{B} \Phi \left(1; \frac{\mu}{\rho v T}; 1; \frac{gT}{v^2}; 1; \frac{B}{T}; \frac{L}{T} \right). \quad (3)$$

Отметим, что силу сопротивления равномерному движению твердого тела в воде в гидромеханике определяют по формуле Ньютона [7]

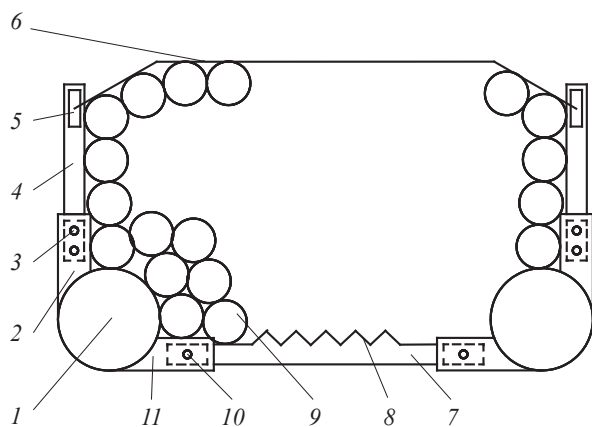


Рис. 1. Схема открытого баржевого модуля: 1 — поплавок; 2 — гнездо стойки; 3 — фиксатор стойки; 4 — стойка; 5 — стопор; 6 — гибкая связь; 7 — основание; 8 — шип; 9 — лесоматериалы круглые; 10 — фиксатор основания; 11 — гнездо основания

Fig. 1. Open barge module: 1 — displacer; 2 — pole mortise; 3 — pole holder; 4 — pole; 5 — stop; 6 — elastic brace; 7 — basement; 8 — dowel; 9 — logs; 10 — basement holder; 11 — basement mortise

$$R = 0,5c\rho\Omega v^2, \quad (4)$$

где c — коэффициент сопротивления;
 Ω — характерная площадь, m^2 .

По аналогии с лесосплавными пучками [6] при продольном движении

$$\Omega = BT. \quad (5)$$

Приняв к сведению формулы (4), (5), легко убедиться, что левая часть выражения (3) равна коэффициенту сопротивления c . В гидромеханике [7] известны такие критерии, как число Рейнольдса $Re = \rho vT/\mu$ и число Фруда

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gT}}.$$

С учетом изложенного преобразуем выражение (3)

$$c = \frac{2T}{B} \varphi \left(1; \frac{1}{Re}; 1; \frac{1}{Fr^2}; 1; \frac{B}{T}; \frac{L}{T} \right).$$

Изменив знак функции, можем представить символическое решение в более простом виде

$$c = \psi(Re; Fr; B/T; L/T). \quad (6)$$

Таким образом, теоретически для коэффициента c определяющими являются четыре фактора, приведенные в скобках в выражении (6). Эти безразмерные величины являются также и критериями подобия, равенство которых в натуральных и модельных условиях необходимо обеспечить в случае физического моделирования рассматриваемого процесса. Известно, что одновременное моделирование по Fr и Re практически невозможно [8]. Однако ОБМ является типичным плохообтекаемым телом с фиксированными зонами отрыва пограничного слоя [6, 7]. Таковыми зонами в данном случае служат кромки лесоматериалов, вертикальных стоек, горизонтальных балок основания. Для тел указанного вида установлен факт несущественной зависимости коэффициента сопротивления c от числа Re [8], ее при подобных исследованиях не учитывают. С учетом этого факта запишем итоговый вариант символического решения

$$c = \gamma(Fr; B/T; L/T).$$

Для получения явного вида этой зависимости обратились к экспериментальным исследованиям. Из-за довольно высокой трудоемкости и ряда проблем, связанных с натурными опытами, указанные исследования провели на моделях в лаборатории водного транспорта леса и гидравлики САФУ. Приняв к сведению базовые размеры ОБМ [3] и габариты опытового бассейна, геометрический масштаб моделирования задали 1:20. Диапазоны варьирования определяющих факторов назначили исходя из базовых размеров ОБМ и предполагаемых скоростей перемещения модулей. Относи-

тельную ширину B/T варьировали от 3,00 до 9,55, относительную длину L/T — от 4,57 до 29,09. Так как мы имеем дело с баржевыми модулями, полагаем, что скорости их перемещения должны быть несколько больше, чем у обычных лесотранспортных единиц, принятый для них диапазон в натуральных условиях 0,6...1,3 м/с. Переход к значениям скоростей моделей осуществляли из условия равенства чисел Fr для натурального ОБМ и модели.

Для буксировки моделей ОБМ использовали нитеблочную систему с трехкратными полиспастами. Скорость равномерного движения моделей варьировали, меняя тяговое усилие, которое создавалось буксировочными грузами. Значение упомянутой скорости определяли с помощью бесконтактного датчика оборотов ВС-401, благодаря которому фиксировали частоту прохождения мимо него светоотражающих меток вращающегося блока, огибаемого кордовой нитью буксировочной системы. Сигналы от датчика после прохождения через дифференциальный усилитель и аналого-цифровой преобразователь поступали на компьютер, где обрабатывались с помощью программы ZETLAB. В результате для каждого опыта программа выдавала зависимость указанной частоты от времени в табличной и графической форме. По этим данным с помощью макроса, написанного в MS Office Excell, получали соответствующие таблицу и график для зависимости скорости движения модели от времени.

Так как ОБМ является плохообтекаемым телом с фиксированными зонами отрыва пограничного слоя и имеет относительно небольшую площадь трения, доля составляющей трения в силе сопротивления воды равномерному движению модуля довольно мала [6, 8]. Поэтому в данном исследовании мы не использовали прием разделения полного сопротивления жидкости на составляющие, реализация которого связана с пересчетом сопротивления трения при переходе от модельных показателей к натурным. При указанных обстоятельствах такой весьма приблизительный пересчет дает поправку в пределах статистической погрешности. В связи с этим логично применение здесь так называемой одночленной формулы (4), используя которую совместно с выражением (5), мы определяли экспериментальное значение коэффициента c . При этом силу R сопротивления воды равномерному движению модели принимали равной тяговому усилию.

Эксперимент выполняли по B -плану второго порядка [9]. В ходе его осуществления провели 14 серий опытов. Каждая серия состоит из 5 продублированных опытов. Общее количество опытов равно 70. Требуемое число дублей опытов установили соответствующим расчетом после проведения пробной серии. Уровень значимости

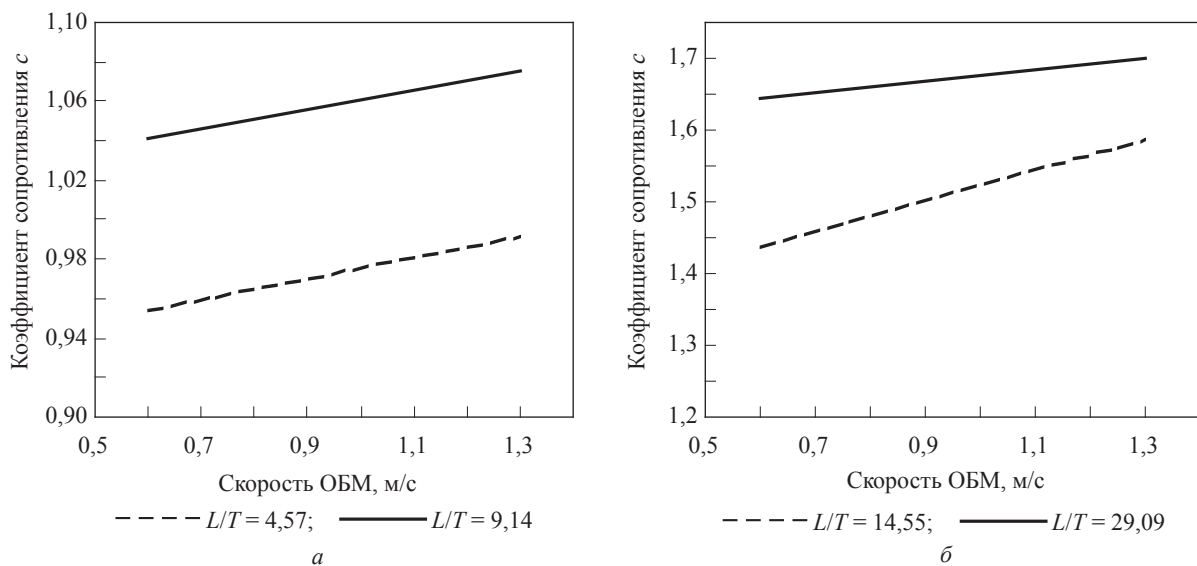


Рис. 2. Графики зависимости коэффициента сопротивления воды c равномерному движению ОБМ от скорости: а — при $B/T = 3,00$; б — при $B/T = 9,55$

Fig. 2. Graphs of dependence of the water resistance coefficient c on the velocity: а — at $B/T = 3,00$; б — at $B/T = 9,55$

при этом был принят 0,05, допустимая относительная ошибка 5 %.

Обработку данных эксперимента выполняли с использованием программы Statistica. В процессе проведения этой обработки принята гипотеза об однородности дисперсии опытов, так как расчетное значение G -критерия Кохрена (0,21) оказалось меньше табличного (0,24) [9]. Дисперсия воспроизводимости опытов получилась равной 0,000324. С целью получения для коэффициента сопротивления c математической модели использовали методику множественного регрессионного анализа. После исключения незначимых коэффициентов с их предварительной оценкой по t -критерию Стьюдента модель приобрела вид уравнения первого порядка, в котором учитывается взаимодействие факторов

$$c = 0,745 + 0,0279 \frac{B}{T} + 0,0202 \frac{L}{T} + 0,0769 Fr \frac{B}{T} - 0,00207 Fr \frac{B L}{T T}. \quad (7)$$

Достоверность аппроксимации [12] довольно высокая: $R^2 = 0,997$.

Применение этого уравнения совместно с формулами (4), (5) позволяет определять силу сопротивления воды равномерному движению ОБМ.

Интерпретация результатов

Полученная модель (7) позволяет оценить характер и степень влияния определяющих факторов на величину коэффициента сопротивления c . При разработке модели мы по ранее указанным причинам перешли от скорости движения ОБМ к

безразмерному критерию Fr . На практике предпочтительнее рассмотрение зависимости коэффициента c от скорости. Принято считать, что у обычных лесотранспортных единиц, являющихся плохообтекаемыми телами с фиксированными зонами отрыва пограничного слоя, указанный коэффициент при наиболее вероятных скоростях перемещения от этих скоростей не зависит. Соответственно, и в рассматриваемом уравнении регрессии коэффициент при Fr оказался незначимым. Тем не менее число Фруда Fr , а следовательно, и скорость оказывают некоторое влияние на коэффициент сопротивления c , так как это число присутствует в слагаемых, учитывающих взаимодействие факторов. Наглядно зависимость c от скорости демонстрируют графики, приведенные на рис. 2.

Изменение скорости от 0,6 до 1,3 м/с при $B/T = 3$ приводит к увеличению коэффициента c всего на 3...4 % (рис. 2, а), при $B/T = 9,55$ — на 3...11 %. Несмотря на небольшую зависимость коэффициента c от скорости число Fr оставлено в уравнении регрессии, поскольку соответствующие коэффициенты в нем при проверке по t -критерию Стьюдента оказались значимыми. Полагаем, что наличие некоторой зависимости от указанного фактора объясняется в данном случае тем, что ОБМ буксировали со скоростями несколько большими, чем те, с которыми принято перемещать обычные лесотранспортные единицы. Это связано с увеличением доли волнового сопротивления и, соответственно, с зависимостью от скорости и потому — от числа Fr [5]. Наиболее существенна зависимость от скорости при малых осадках

и малой длине ОБМ, обуславливающей большее волновое сопротивление, что соответствует положениям гидромеханики [7].

По взаимному расположению графиков на рис. 2 понятно, что увеличение относительной длины L/T приводит к увеличению коэффициента c . При малой относительной ширине $B/T = 3,00$ увеличение L/T в пределах рассматриваемого диапазона приводит к возрастанию указанного коэффициента на 8...9 % (см. рис. 2, а), при наибольшем значении $B/T = 9,55$ — на 7...15 % (рис. 2, б). Причем большее возрастание характерно для меньших скоростей. Полагаем, что возрастание коэффициента c в данном случае обусловлено увеличением площади трения и, соответственно, составляющей трения в общем сопротивлении. Поскольку преобладающим у таких тел все же является сопротивление формы, указанное возрастание невелико.

Наибольшее влияние на величину коэффициента c оказывает относительная ширина B/T . Увеличение ее с 3,00 до 9,55 в результате уменьшения осадки конкретного модуля от максимального до минимального значения обуславливает возрастание указанного коэффициента на 50...60 %. Нижняя граница этого диапазона связана с наименьшей скоростью и наименьшей длиной ОБМ. При увеличении осадки ОБМ с минимального до максимального значения характерная площадь Ω , согласно формуле (5), увеличивается в 3,18 раза, а коэффициент c уменьшается в 1,5–1,6 раза. В итоге сила сопротивления воды в соответствии с формулой (4) возрастает в 1,99–2,12 раза.

Выводы

В результате исследования, выполненного по данным проведенного эксперимента, получена регрессионная модель для коэффициента сопротивления воды c равномерному движению ОБМ. Использование этой модели обеспечивает возможность определения силы указанного сопротивления с помощью формул (4), (5).

Определяющими факторами для упомянутого коэффициента являются число Фруда Fr , относительные длина L/T и ширина B/T ОБМ. Увеличение скорости движения и относительной длины модуля в пределах принятых диапазонов варьирования приводит к небольшому возрастанию

коэффициента c на 3...11 % и 7...15 % соответственно. Наибольшее влияние на коэффициент сопротивления c оказывает относительная ширина модуля. Ее изменение с 3,00 до 9,55 приводит к увеличению коэффициента c на 50...60 %.

Полученная информация необходима для выполнения инженерных расчетов, связанных с проектированием и эксплуатацией ОБМ, применение которых предполагает создание новых возможностей по организации экономичного, экологически безопасного водного транспорта для перевозки круглых лесоматериалов, в том числе ограниченной плавучести.

Список литературы

- [1] Посыпанов С.В. Экологические и экономические аспекты транспорта древесины из удаленных лесных массивов // Эколого- и ресурсосберегающие технологии и системы в лесном и сельском хозяйстве: сб. науч. тр. Воронеж: ВГЛТА, 2014. Вып. № 3. Ч. 4 (8–4). С. 135–139.
- [2] Суров Г.Я., Барабанов В.А., Кудрявцев Г.В. Контейнер. Пат. 147720 U1 Российская Федерация, МПК В65D88/00. Заявитель и патентообладатель САФУ. № 2014125335/12; заявл. 23.06.2014; опубл. 20.11.2014.
- [3] Суров Г.Я., Посыпанов С.В., Коробицын А.В. Технические решения для транспортировки по воде круглых лесоматериалов с недостаточной плавучестью // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика: сб. науч. тр. Воронеж: ВГЛТУ, 2015. Вып. № 9. Ч. 3 (20–3). С. 92–95.
- [4] Коробицын А.В., Посыпанов С.В. Организация разгрузочных устройств для транспортировки лесоматериалов ограниченной плавучести по воде // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика: сб. науч. тр. Воронеж: ВГЛТУ, 2015. Вып. № 8. Ч. 2 (19–2). С. 236–238.
- [5] Войткунский Я.И. Сопротивление движению судов. 2-е изд., доп. и перераб. Л.: Судостроение, 1988. 288 с.
- [6] Корпачев В.П., Рябоконт Ю.И. Сопротивление воды движению лесотранспортных единиц в водном потоке. Красноярск: РИО СТИ, 1978. 62 с.
- [7] Войткунский Я.И., Фадеев Ю.И., Федяевский К.К. Гидромеханика. Л.: Судостроение, 1982. 568 с.
- [8] Родионов П.М. Метод подобия и его применение к решению задач лесосплава. Л.: ЛТА, 1982. 84 с.
- [9] Пижурин А.А. Основы научных исследований в деревообработке. М.: МГУЛ, 2005. 305 с.
- [10] Kleinstreuer C. Modern Fluid Dynamics. Springer Netherlands, 2010.
- [11] Larsson L., Stern F., Visonneau M. Numerical ship hydrodynamics. Springer Netherlands, 2014.
- [12] Weisberg S. Applied Linear Regression: Third edition. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2005, 329 p.

Сведения об авторах

Посыпанов Сергей Валентинович — канд. техн. наук, доцент ФГАОУ ВПО «Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова», e-mail: s.posypanov@narfu.ru

Коробицын Андрей Владимирович — аспирант ФГАОУ ВПО «Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова», e-mail: andreykorob@bk.ru

Статья поступила в редакцию 02.06.2016 г.

INVESTIGATION OF AN OPEN BARGE MODULE UNIFORM MOTION

S.V. Posypanov, A.V. Korobitsyn

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov (NARFU),
nab. Severnoy Dviny, 17, 163002, Arkhangelsk, Russia

s.posypanov@narfu.ru

Taking into consideration the low density of roads in the basic forest regions of Russia, accessibility of wood resources can be provided by using a network of the medium-scale and small rivers. One of eco-friendly and feasible methods of transportation of forest products is haulage by vessels. However, the use of conventional vessels at the medium-scale and small rivers is restrained. The paper presents an alternative: the open barge modules (OBM). Forming of barge trains consisting of the OBMs has been proposed. The train dimensions are to be determined by the conditions of a given river during the desired season. The usage of OBMs provides transportation of the low floatability logs and minimization of a vessel's draft. The designing and usage of an OBM have to be based on information concerning water resistance — particularly to the uniform motion of a floating vessel. The examination of relevant publications proved the necessity of the proposed study. Based on the hydromechanics provisions, the primary factors of the resistance force to an OBM uniform motion were determined. The criterial form of the task solution has been presented. Excluding the Reynolds number from the determining factors has been explained. The resulting symbolic solution presents the dependence of a coefficient of water drag resistance to a uniform OBM motion on the Froude number and on a module's length/beam, relatively to its draft. To discover the above dependence in an explicit form some experiments with the modules under study were carried out. As a result of these experiments, the regression equation for the drag coefficient was developed. Applying the equation together with the Newton formula enables us to determine the force of water resistance to a uniform OBM motion. The investigation of the model allows to make the following conclusion: the increase of the OBM velocity and of its relative length gives the increase of the water resistance coefficient as follows 3...11 % and 7...15 % correspondingly. The most significant factor is the module's beam related to draft; its variation within a given range causes 50..60 % increase of a resistance coefficient.

Keywords: round wood transportation, open barge module, water resistance, uniform motion

Suggested citation: Posypanov S.V., Korobitsyn A.V. *Issledovanie ravnomernogo dvizheniya otkrytogo barzhevogo modulya* [Investigation of an open barge module uniform motion]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, v. 21, no. 1, pp. 95–100. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-95-100

References

- [1] Posypanov S.V. *Ekologicheskiye i ekonomicheskiye aspekty transporta drevesiny iz udalennykh lesnykh massivov* [Ecological and economic aspects of forest products transportation from the remote woodlands]. *Ekologo- i resursosberegayushchie tekhnologii i sistemy v lesnom i sel'skom khozyaystve: sborn. nauchn. tr. po material. mezhdunarod. zaoch. nauch.-prakt. konf.* [Ecological and resource-saving technologies and systems in forestry and agriculture: Proc. International Open Scient.-Pract. Conf.] Voronezh: VGLTA Publ., 2014, v. 3, part 4 (8–4), pp. 135-139. (in Russian)
- [2] Surov G. Ya., Barabanov V.A., Kudryavtsev G.V. *RF Patent No. 147720 U1, MPK B65D88/00* [Applicant and patent holder: NARFU No. 2014125335/12, appl. 23.06.2014; publ. 20.11.2014.] (in Russian)
- [3] Surov G. Ya., Posypanov S.V., Korobitsyn A.V. *Tekhnicheskiye resheniya dlya transportirovki po vode kruglykh lesomaterialov s nedostatochnoy plavuchesti* [Technical solutions of low-buoyant round wood water transportation] *Proc. Actual trends of scientific researches in XXI century: theory and practice.* Voronezh, 2015, no. 9, p. 3 (20–3), pp. 92-95. (in Russian)
- [4] Korobitsyn A.V., Posypanov S.V. *Organizatsiya razgruzki ustroystv dlya transportirovki po vode lesomaterialov s nedostatochnoy plavuchesti* [Arrangement of discharging of facilities for of low-buoyant round wood water transportation] *Proc. Actual trends of scientific researches in XXI century: theory and practice.* Voronezh, 2015, no. 8, p. 2 (19-2), pp. 236-238. (in Russian)
- [5] Voytkunskiy Ya.I. *Soprotivleniye dvizheniyu sudov* [Resistance to vessels motion]. Leningrad: Sudostroyeniye Publ., 1988, 288 p. (in Russian)
- [6] Korpachyov V.P. *Soprotivleniye vody dvizheniyu lesotransportnykh edinit v vodnom potoke* [Water resistance to motion of the rafting units in a water current] Krasnoyarsk: STI, 1978, 62 p. (in Russian)
- [7] Voytkunskiy Ya.I. *Gidromekhanika* [Hydromechanics] Leningrad: Sudostroyeniye Publ., 1982, 568 p. (in Russian)
- [8] Rodionov P.M. *Metod podobija i yego primeneniye k resheniyu zadach lesosplava* [The resemblance method and its appliance to the problems of timber floating] Leningrad: LTA Publ., 1982, 84 p. (in Russian)
- [9] Pizhurin A.A. *Osnovy nauchnykh issledovaniy v derevoobrabotke* [Basis of scientific researches in woodworking] Moscow: MGUL Publ., 2005, 305 p. (in Russian)
- [10] Kleinstreuer C. *Modern Fluid Dynamics.* Springer Netherlands, 2010.
- [11] Larsson L., Stern F., Visonneau M. *Numerical ship hydrodynamics.* Springer Netherlands, 2014.
- [12] Weisberg S. *Applied Linear Regression: Third edition.* Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2005. 329 p.

Author's information

Posypanov Sergey Valentinovich — Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof. at the Northern Research Institute of Forestry, Forest Assessment and Management Department at the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, e-mail: s.posypanov@narfu.ru

Korobitsyn Andrey Vladimirovich — pg. at the Northern Research Institute of Forestry, Forest Assessment and Management Department at the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, e-mail: andreykorob@bk.ru

Received 02.06.2016