

Г.В. Кудрявцев, С.В. Посыпанов

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗГОНА ЖЕСТКИХ ПЛАВУЧИХ КОНТЕЙНЕРОВ

Введение. Доступность большой доли лесных ресурсов в основных лесных регионах России зачастую возможно обеспечить лишь за счет хорошо развитой речной сети, основу которой составляют средние и малые реки. Один из основных способов транспортировки лесоматериалов по воде – судовые перевозки, которые осуществляются преимущественно с использованием барж. Размеры барж, как правило, не позволяют использовать их на малых, а при снижении уровней воды и на средних реках. Для обеспечения возможности осуществления судовых перевозок лесоматериалов по указанным рекам предложены конструкции жесткого плавучего контейнера [Пат. 147720 РФ; Суров и др., 2015], иначе баржевого модуля (БМ). Одна из конструкций схематично изображена на рис. 1. Из БМ предполагается формировать баржевые составы [Пат. 147036 РФ; Суров и др., 2015], размеры которых можно изменять в зависимости от конкретных путевых условий. Технология формирования таких составов описана авторами ранее [Кудрявцев, Посыпанов, 2015, 2016].

Для выполнения технологических и транспортных расчетов, связанных с перемещением БМ и составов из них, необходимы сведения о сопротивлении воды, возникающем при их движении. На первом этапе было рассмотрено равномерное движение в воде отдельных БМ [Кудрявцев, Посыпанов, 2016]. Более сложное неравномерное движение БМ, представляющее не меньший интерес, до настоящего времени оставалось неисследованным.

Неравномерному движению в воде лесотранспортных единиц (ЛТЕ) посвящено немало работ. К их числу относятся, например, [Чекалкин, 1981; Харитонов, 1984; Митрофанов, 2007; Овчинников, Родионов, 1979]. В них рассматривается перемещение плотов, плоских сплочных единиц, пучков и т. д.

Исследовалось, разумеется, и неравномерное движение судов. Список трудов, в которых отражены соответствующие материалы, весьма значителен. К числу таких трудов относятся, в частности, [Войткунский, 1988; Kleinstreuer, 2010; Larsson, Stern, Visonneau, 2014].

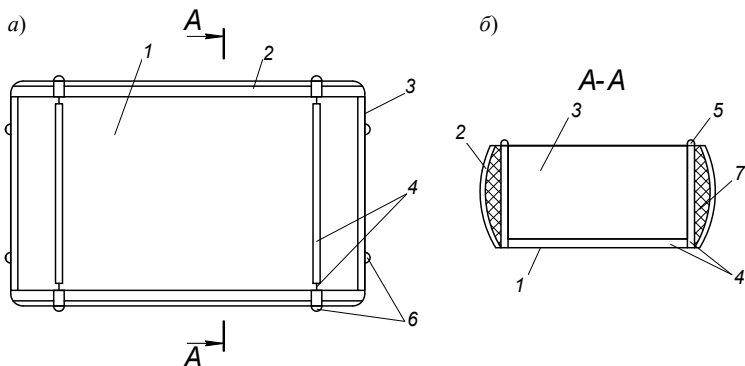


Рис. 1. Жесткий плавучий контейнер: а – вид сверху; б – поперечный разрез; 1 – днище; 2 – боковые стенки; 3 – торцовые стенки; 4 – балки; 5 – грузовые петли; 6 – отбойные устройства; 7 – наполнитель

Fig. 1. Rigid floating container: a – top view; b – crosscut; 1 – bottom; 2 – side walls; 3 – end walls; 4 – beams; 5 – cargo loops; 6 – breakers; 7 – filler

От ЛТЕ БМ отличаются материалом обтекаемых поверхностей, а также местной конфигурацией последних. По сравнению с судами, даже с очень простыми корпусами, БМ имеют менее обтекаемую форму, что обусловлено в первую очередь необходимостью компактной установки их в баржевом составе. Отмеченные факты предполагают отличия и в гидротехнических характеристиках.

На основании изложенного был сделан вывод о целесообразности выполнения дополнительных исследований для получения данных о неравномерном движении в воде БМ.

Цель работы – получение информации, необходимой для определения параметров неравномерного движения БМ в ходе их разгона.

Для достижения цели были определены следующие задачи:

- 1) установить факторы, влияющие на процесс разгона БМ в воде;
- 2) выполнить экспериментальные исследования на моделях процесса разгона БМ в воде;
- 3) с помощью метода множественной регрессии получить математическую модель для определения значений интервального коэффициента фиктивного увеличения массы БМ;
- 4) выполнить анализ полученной регрессионной модели.

Методы исследования. Использовали экспериментально-теоретические методы исследований, которые проводились на основе положений

гидромеханики, математического анализа, статистики, теорий размерностей и подобия, планирования эксперимента. При исследованиях применили методику, предложенную в работе [Посыпанов, 2016], которая по сравнению с ранее используемой применительно к различным ЛТЕ [Митрофанов, 2007] обуславливает более точное определение параметров их неравномерного движения в воде и уменьшение трудоемкости обработки опытных данных.

Дифференциальное уравнение разгона БМ в воде в соответствии с [Посыпанов, 2016]

$$M\phi \frac{dv}{dt} = -R + F, \quad (1)$$

где M – масса баржевого модуля, кг; ϕ – коэффициент фиктивного увеличения массы (КФУМ) [Посыпанов, 2016]; dv/dt – линейное ускорение баржевого модуля, м/с²; R – сопротивление воды равномерному движению баржевого модуля при текущем значении скорости, Н; F – проекция на направление движения равнодействующей сил, приложенных к баржевому модулю извне, Н.

Согласно используемой методике, изменяющее в процессе движения значение ϕ замещается постоянной для данного конкретного случая величиной Φ – интервальным коэффициентом фиктивного увеличения массы. Значение Φ таково, что соотношение между параметрами движения остается таким же, каким оно является в действительности.

В результате решения с учетом принятых положений дифференциального уравнения (1) автор работы [Посыпанов, 2016] получил в частности формулу для случая разгона постоянной силой ЛТЕ от нулевой скорости относительно воды

$$t = \frac{\Phi M}{r v_F} \operatorname{arth} \frac{v_k}{v_F}, \quad (2)$$

где t – время разгона, с; v_k – скорость движения ЛТЕ относительно воды в конце рассматриваемого временного интервала, м/с; v_F – скорость равномерного движения ЛТЕ относительно воды, соответствующая разгоняющему усилию, м/с; r – удельное сопротивление равномерному движению в воде, Н·с²/м² [Посыпанов, 2016].

Также получены формулы и для других параметров движения (путь, ускорение и т. д.).

В соответствии с работой [Посыпанов, 2016] в случае разгона постоянной силой плохо обтекаемых тел с фиксированными зонами отрыва по-

граничного слоя и незначительной долей составляющей трения в общем сопротивлении воды зависимость интервального коэффициента фиктивно-го увеличения массы Φ от определяющих факторов имеет вид

$$\Phi = \gamma \left(Fr, \frac{v_k}{v_F}, \frac{B}{T}, \frac{L}{T} \right), \quad (3)$$

где Fr – число Фруда, соответствующее скорости v_F ; v_k/v_F – относительная скорость в конце рассматриваемого интервала движения; B, L, T – ширина, длина и осадка ЛТЕ соответственно, м.

БМ относится к категории тел, для которых справедлива зависимость (3). Для приведения этой зависимости к явному виду провели экспериментальные исследования на моделях в опытовом бассейне гравитационного типа, на базе которого смонтировали лабораторную установку (рис. 2). Длина бассейна 11 м, ширина 3 м, максимально возможная глубина воды 0,35 м. Геометрический масштаб моделирования 1:20.

Для буксировки моделей использовалась нитеблочная система с трехкратными полиспадами (рис. 2). Необходимое тяговое усилие создавали с помощью вертикально перемещающихся грузов. Силы трения качения в блоках компенсировали небольшим добавочным грузом, массу которого подбирали опытным путем. Один из блоков буксировочной системы имеет радиальные светоотражающие метки. При вращении этого блока прохождение каждой метки мимо бесконтактного датчика оборотов ВС-401 приводило к генерированию им электрического сигнала. Эти сигналы через дифференциальный усилитель ZET-410, а затем через аналого-цифровой преобразователь ZET-220 поступали на ноутбук. Регистрация, запись сигналов и их первичная обработка осуществлялись программным обеспечением «ZETLAB». В результате этой обработки по каждому опыту строились график зависимости частоты сигналов от времени и соответствующая таблица. Графики использовали для промежуточного контроля.

Эксперименты проводили по плану второго порядка. Диапазоны варьирования определяющих безразмерных факторов назначили исходя из предполагаемых значений соответствующих размерных величин. При этом ориентировались на базовые размеры контейнера [Самсонов, Барабанов, 2013]: ширина 4,8 м, длина 7,0...14,0 м. Изменение осадки БМ предполагалось в диапазоне 0,44...1,34 м, скорости – 0,9...1,7 м/с. Заметим, что диапазон скорости в рассматриваемом случае является промежуточным между соответствующими диапазонами обычных ЛТЕ и тихоходных судов [Кудрявцев, Посыпанов, 2016].

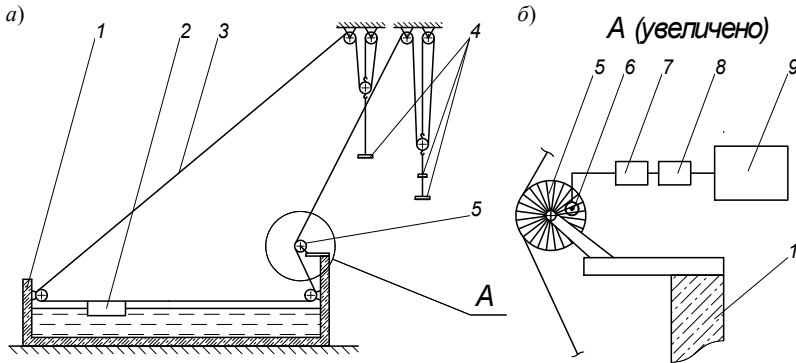


Рис. 2. Схема лабораторной установки: а – опытный бассейн с буксировочной системой; б – система регистрации; 1 – опытный бассейн; 2 – модель БМ; 3 – нитеблочная система; 4 – грузы; 5 – блок со светоотражающими метками; 6 – бесконтактный датчик оборотов BC-401; 7 – дифференциальный усилитель ZET-410; 8 – аналого-цифровой преобразователь ZET-220; 9 – ноутбук

Fig. 2. Scheme of laboratory installation: a – model tank with towing system; b – registration system; 1 – model tank; 2 – BM model; 3 – towing system; 4 – weights; 5 – block with reflective marks; 6 – contactless optical RPM sensors BC-401; 7 – signal amplifier ZET-410; 8 – ADC DAC module ZET-220; 9 – laptop

Всего проведено 27 серий опытов (по каждому опыту получали три значения относительной скорости), в каждой серии по 5 дублирований, общее количество опытов – 135. Необходимое количество дублирований опытов определено расчетом по результатам статистической обработки пробной серии при принятой допустимой относительной погрешности 5%.

Дальнейшая обработка экспериментальных данных осуществлялась в «MS Office Excel» с использованием макроса, который обеспечивал экспорт табличных данных из «ZETLAB». В макросе предусмотрено определение по частотам сигналов бесконтактного датчика частот вращения блока со светоотражающими метками, скоростей движения кордовой нити, которые соответствуют скоростям модели БМ. В результате реализации алгоритма макроса получали таблицы и графики, отражающие зависимости скорости перемещения модели от времени.

В соответствии с методикой [Посыпанов, 2016] устанавливали скорость равномерного движения БМ v_F , используя формулу (4) и графики зависимости скорости движения БМ от времени.

$$v_F = \frac{v_1 v_3 - (v_2)^2}{v_1 + v_3 - 2v_2}, \quad (4)$$

где v_1, v_2, v_3 – скорости на участке графика, приближенном к его асимп-
те, определяемые по порядку через равные интервалы времени.

По установленной скорости v_F определяли соответствующее число
Фруда Fr согласно формуле

$$Fr = \frac{v_F}{\sqrt{gT}}, \quad (5)$$

где g – ускорение свободного падения, m/c^2 .

Диапазон варьирования фактора v_k/v_F принимали с учетом ре-
комендаций, приведенных в работе [Посыпанов, 2016]. Указанному
фактору присваивали значения 0,1; 0,5; 0,9. Для этих величин по установ-
ленной скорости v_F вычисляли советуемые значения v_k , а по ним, ис-
пользуя вышеупомянутые графики, определяли соответствующие значе-
ния t .

Для каждой пары v_k/v_F и t вычисляли величину Φ . При этом использо-
вали выражение

$$\Phi = \frac{r v_F}{Marth\left(\frac{v_k}{v_F}\right)} t, \quad (6)$$

полученное из формулы (2). Удельное сопротивление r находили предва-
рительно посредством деления тягового усилия F , определяемого по мас-
сам грузов буксировочной системы, на квадрат скорости v_F .

После определения всех значений выходной величины, предусмотрен-
ных планом эксперимента, была выполнена первичная статистическая об-
работка согласно Пижурину А.А. (учебник «Основы научных исследова-
ний в деревообработке». М.: МГУЛ, 2005). В ходе ее вычислены средние
значения выходной величины в сериях, дисперсии по сериям, расчетное
значение критерия Кохрена $G_{расч} = 0,165$. Поскольку табличное значение
 $G_{табл} = 0,584$ по Пижурину А.А., 2005, то условие $G_{расч} < G_{табл}$ выполняется,
следовательно, можно принять гипотезу об однородности дисперсий опы-
тов.

Результаты первичной статистической обработки позволили сде-
лать вывод о допустимости применения множественного регрессионно-
го анализа [Weisberg, 2005] для получения зависимости (2) в явном
виде. Выполняли его с помощью программы «Statistica». Принятый тип
модели для интервального КФУМ – уравнение регрессии второго порядка

с наличием взаимодействия факторов. Отбор коэффициентов регрессионной модели осуществлялся по уровню значимости с контролем по t -критерию Стьюдента. В итоге было получено следующее уравнение регрессии:

$$\begin{aligned} \Phi = & 3,244 - 11,44 \frac{v_k}{v_F} + 10,251Fr + 0,063Fr \frac{v_k}{v_F} \frac{L}{T} \frac{B}{T} - 2,191Fr \frac{v_k}{v_F} \frac{B}{T} - \\ & - 0,0279 \frac{v_k}{v_F} \frac{L}{T} \frac{B}{T} + 1,309 \frac{v_k}{v_F} \frac{B}{T} - 0,254Fr \frac{L}{T} + 5,996 \left(\frac{v_k}{v_F} \right)^2. \end{aligned} \quad (7)$$

Значение коэффициента детерминации для полученной модели $R^2 = 0,77$, что свидетельствует о вполне приемлемой достоверности аппроксимации.

Вычислив с помощью уравнения (7) значение интервального КФУМ, можно по формуле (2) определить продолжительность разгона БМ постоянной силой F до заданной скорости. Используя формулы и рекомендации работы [Посыпанов, 2016], можно установить также другие параметры движения БМ при разгоне.

В полученной модели степень и характер влияния определяющих факторов на результат в значительной мере зависят от их взаимодействия. Оценить это влияние можно только, выполнив расчеты, соответствующие конкретным сочетаниям факторов. Влияние взаимодействия факторов наглядно демонстрируют графики, представленные на рис. 3. Согласно им в рассматриваемом примере интервальный КФУМ Φ линейно возрастает с увеличением числа Фруда Fr . При больших относительных длинах БМ, соответствующих минимальной осадке, а значит, и максимальной относительной его ширине $B/T=10,2$, указанное возрастание невелико. Так при $L/T = 31,8$ в рассматриваемом диапазоне числа Фруда Fr оно составляет лишь 9%. Уменьшение относительной длины БМ до 5,2 в результате увеличения его осадки и соответственно уменьшения относительной ширины B/T до 3,6 приводит к существенному усилению влияния числа Фруда Fr . В том же его диапазоне интервальный КФУМ Φ в этом случае возрастает уже на 33% (верхний график). Заметим, что верхний и средний графики построены для одной и той же абсолютной длины БМ. То есть относительная ширина БМ, сказываясь согласно уравнению (7) лишь через взаимодействия факторов, очень существенно влияет на результат.

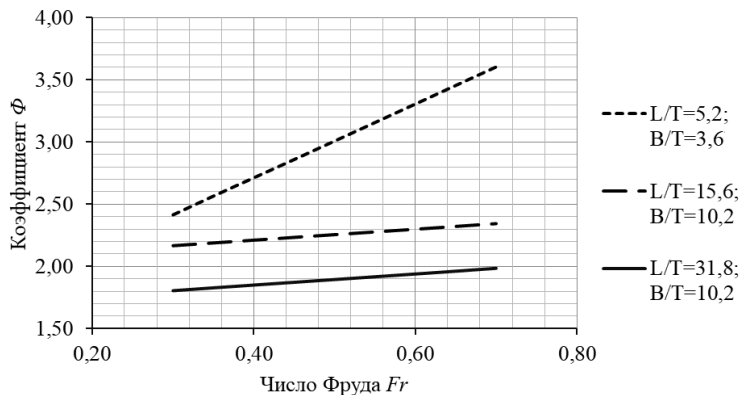


Рис. 3. Графики зависимости интервального КФУМ Φ от числа Fr при $v_k/v_F = 0,9$ и различных L/T и B/T

Fig. 3. Graphs of dependence of the interval CIMI Φ on the Froude number Fr at $v_k/v_F = 0,9$ and various L/T and B/T

Также графики на рис. 3 демонстрируют, что увеличение относительной длины БМ приводит к уменьшению значения Φ . Выполненные расчеты показали, что с увеличением v_k/v_F коэффициент Φ также уменьшается.

Выводы. Обратившись к методике, рекомендованной в работе [Посыпанов, 2016] для исследования неравномерного движения в воде лесотранспортных единиц, привели выражение для определения интервального коэффициента фиктивного увеличения массы Φ в случае их разгона постоянной силой. Опираясь на положения гидромеханики, убедились, что БМ относится к плохообтекаемым телам с фиксированными зонами отрыва пограничного слоя и незначительной долей составляющей трения в общем сопротивлении воды. На основании этого и информации из работы [Посыпанов, 2016] установили, что определяющими факторами для коэффициента Φ при разгоне БМ являются число Фруда, соответствующее скорости равномерного движения при тяговом усилии равно разгоняющему; отношение скорости в конце рассматриваемого интервала движения к скорости указанного равномерного движения; ширина и длина БМ, отнесенные к его осадке. Используя результаты выполненных авторами экспериментальных исследований, получили регрессионную модель для означенного коэффициента, знание величины которого дает возможность определять параметры движения БМ при его разгоне. В ходе анализа мо-

дели установили, что коэффициент Φ в рассмотренных случаях линейно возрастает с увеличением числа Фруда Fr . Интенсивность этого возрастания увеличивается при больших осадках БМ, то есть при малых относительных его ширинах. Увеличение относительной длины БМ приводит к уменьшению коэффициента Φ . Уменьшается коэффициент Φ и с увеличением рассматриваемого интервала движения, то есть с увеличением относительной скорости v_k/v_F в конце указанного интервала. Взаимодействия определяющих факторов очень существенно влияют на степень, а иногда и на характер влияния последних на выходную величину.

Полученные материалы предоставляют возможность выполнения инженерных расчетов, связанных с разгоном БМ при реализации технологических процессов, предполагаемых при перевозках круглых лесоматериалов, а также других грузов по средним и малым рекам.

Библиографический список

Войткунский Я.И. Сопротивление движению судов. 2-е изд. Л.: Судостроение, 1988. 288 с.

Кудрявцев Г.В., Посыпанов С.В. Технологические схемы погрузки жестких контейнеров // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. № 8-2 (19-2). С. 258–261.

Кудрявцев Г.В., Посыпанов С.В., Исследование сопротивления воды равномерному движению жестких плавучих контейнеров в условиях мелководья // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2016. № 4 (32). С. 47–56.

Митрофанов А.А. Лесосплав. Новые технологии, научное и техническое обеспечение: монография. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2007. 492 с.

Овчинников М.М., Родионов П.М. Сопротивление движению хлыстовых плотов // Лесн. пром-сть. 1979. № 6. С. 28–29.

Пат. 147036 U1 Российская Федерация, МПК В65G69/20 Плотноход / Суров Г.Я., Барабанов В.А., Кудрявцев Г.В., заявитель и патентообладатель САФУ № 2014125331/11; заявл. 23.06.2014; опубл. 27.10.2014.

Пат. 147720 U1 Российская Федерация, МПК В65D88/00 Контейнер / Суров Г.Я., Барабанов В.А., Кудрявцев Г.В., заявитель и патентообладатель САФУ – № 2014125335/12; заявл. 23.06.2014; опубл. 20.11.2014.

Посыпанов С.В. Метод экспериментального определения коэффициента фиктивного увеличения массы лесотранспортных единиц при их неравномерном движении в воде // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. 2016. № 6. С. 122–130.

Самсонов С.В., Барабанов В.А. Обоснование технических параметров плавучих контейнеров для транспортировки лесоматериалов и результаты исследо-

вания их гидродинамических характеристик // Изв. вузов. Лесной журнал. 2013. № 6. С. 57–65.

Суров Г.Я., Барабанов В.А., Кудрявцев Г.В. Новое в доставке лесных грузов по водным путям // Аспирант: сборник трудов конференции. Ростов-на-Дону, 2015. С. 66–71.

Харитонов В.Я. Использование теории присоединенных масс в лесосплавных исследованиях и расчетах // Изв. вузов. Лесной журнал. 1984. № 5. С. 43–48.

Худоногов В.Н. Гидродинамическое взаимодействие плотов и внешней среды: монография / отв. ред. А.М. Караваяев; Сибирский технологический институт. Красноярск: Кн. изд-во, 1966. С. 226.

Чекалкин К.А. Движение твердых тел в жидкости. Л.: ЛТА, 1981. 48 с.

Kleinstreuer C. Modern Fluid Dynamics. Springer Netherlands, 2010.

Larsson L., Stern F., Visonneau M. Numerical ship hydrodynamics. Springer Netherlands, 2014.

Weisberg S. Applied Linear Regression: Third edition. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2005. 329 p.

References

Vojtkunskij Ya.I. Soprotivlenie dvizheniyu sudov. 2-e izd. L.: Sudostroenie, 1988. 288 s. (In Russ.)

Kudryavtsev G.V., Posypanov S.V. Tekhnologicheskiye skhemy pogruzki zhestkikh konteynerov [Technological schemes of lading of the rigid containers]. *Proc. Actual trends of scientific researches in XXI century: theory and practice*, 2015, no. 8-2 (19-2), pp. 258–261. (In Russ.)

Kudryavtsev G.V., Posypanov S.V. Issledovanie soprotivleniya vody ravnomernomu dvizheniyu zhyostkikh plavuchih kontejnerov v usloviyah melkovodya [Research into hydraulic resistance to uniform flow of rigid floating containers in shallow waters]. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management*, 2016, no. 4 (32), pp. 47–56. DOI: 10.15350/2306-2827.2016.4.47 (In Russ.)

Mitrofanov A.A. Lesospлав. Noviyе tekhnologii, nauchnoye i tekhnicheskoye obespёchehiye: monografiya [Timber Floating. New technologies, scientific and technical provisions: monograph]. Arkhangelsk, AGTU Publ., 2007. 492 p. (In Russ.)

Ovchinnikov M.M. Soprotivleniye dvizheniyu khlystovukh plotov [Tractive resistance of the tree-long logs rafts]. *Timber Industry*, 1979, no. 6, pp. 28–29. (In Russ.)

RF Patent No. 147720 U1, MPK B65D88/00 The container / Surov G.Ya., Barabanov V.A., Kudryavtsev G.V. Applicant and patent holder: NARFU No. 2014125335/12, appl. 23.06.2014; publ. 20.11.2014. (In Russ.)

RF Patent No. 147036 U1, MPK B65G69/20 The raft / Surov G.Ya., Barabanov V.A., Kudryavtsev G.V. Applicant and patent holder: NARFU No. 2014125331/11, appl. 23.06.2014; publ. 27.10.2014. (In Russ.)

Posypanov S.V. Experimental determination of the imaginary coefficient of a mass increment of a timber rafting unit during non-stationary motion in water. *Forestry Bulletin*, 2006, no. 6, pp. 122–130.

Samsonov S.V., Barabanov V.A. Obosnovaniye tekhnicheskikh parametrov plavuchikh kontejnerov dlya transportirovki lesomaterialov i rezultaty issledovaniya ikh gidrodinamicheskikh kharakteristik [Substantiation of the technical parameters of the floating containers for round wood transportation and results of their hydrodynamic characteristics investigation]. *Bulletin of higher education institutions. Lesnoy Zhurnal. – NARFU Publ*, 2013, no. 6, pp. 57–65. (In Russ.)

Khudonogov V.N. Gidrodinamicheskoye vzaimodeystviye plotov i vneshney sredy: monografiya [Hydrodynamic interaction of the rafts and environment: monograph]. SIBTI: Krasnoyarsk, 1966. 226 p. (In Russ.)

Surov G.Ya., Barabanov V.A., Kudryavtsev G.V. Novoye v dostavke lesnykh gruzov po vodnym putyam [A novel in water transportation of timber cargoes]. *Proc. Aspirant*. Rostov-Don, 2015, pp. 66–71. (In Russ.)

Chekalkin K.A. Dvizhenie tverdykh tel v zhidkosti. L.: LTA, 1981. 48 s. (In Russ.)

Kleinstreuer C. Modern Fluid Dynamics / Springer Netherlands, 2010.

Larsson L., Stern F., Visonneau M. Numerical ship hydrodynamics / Springer Netherlands, 2014.

Weisberg S. Applied Linear Regression: Third edition. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2005. 329 p.

Материал поступил в редакцию 14.05.2018 г.

Кудрявцев Г.В., Посыпанов С.В. Результаты исследования разгона жестких плавучих контейнеров // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2018. Вып. 225. С. 155–167. DOI: 10.21266/2079-4304.2018.225.155-167

Экономическую доступность значительной части лесных ресурсов в основных лесных регионах страны можно обеспечить только при использовании густой речной сети, состоящей преимущественно из средних и малых рек. Значительную роль при этом могут сыграть судовые перевозки. Баржи, обычно используемые для перевозки лесоматериалов по внутренним водным путям, из-за больших размеров не применимы на малых, а при снижении уровней и на средних реках. На указанных реках предлагается использовать баржевые составы, размеры которых можно варьировать в соответствии с конкретными путевыми условиями посредством изменения количества контейнеров или баржевых модулей (БМ), устанавливаемых в баржевой состав. Для выполнения инженерных расчетов, связанных с перемещением БМ и баржевых составов, нужны сведения о сопротивлении воды их движению. Целью настоящей работы

является получение информации, необходимой для определения параметров движения БМ в процессе его разгона. Метод исследования – экспериментально-теоретический. В ходе теоретических исследований выявлены факторы, влияющие на процесс разгона БМ в воде и определяющие величину интервального коэффициента фиктивного увеличения его массы (КФУМ). Проведены экспериментальные исследования на моделях по плану второго порядка. По их результатам получена регрессионная модель для интервального КФУМ БМ при его разгоне. Вычислив с ее помощью величину означенного коэффициента, можно, воспользовавшись известными формулами, определить параметры движения БМ при его разгоне. В результате анализа модели установили, что в рассмотренных случаях интервальный КФУМ Φ линейно возрастает с увеличением числа Фруда. Интенсивность указанного возрастания становится больше при увеличении осадки БМ, то есть при уменьшении его относительной ширины. С увеличением относительной длины БМ коэффициент Φ уменьшается. Уменьшается он и с увеличением степени завершенности процесса разгона. Степень и характер влияния определяющих факторов на результат существенно зависят от их взаимодействия. Достоверно оценить указанное влияние в каждом конкретном случае можно лишь выполнив расчеты, соответствующие определенному сочетанию факторов.

Ключевые слова: плавучий контейнер, баржевой модуль, экспериментальные исследования, неравномерное движение, сопротивление воды, скорость, транспорт лесоматериалов.

Kudryavtsev G.V., Posypanov S.V. Investigation findings of acceleration of rigid floating containers. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicoskoj Akademii*, 2018, is. 225, pp. 155–167 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2018.225.155-167

Economic accessibility of a significant part of forest resources in the main forest regions of the country can be provided only by using a dense network of rivers, consisting mainly of medium and small rivers. Shipments can play significant role in this. Typically, the barges are used for the transport of timber along inland waterways, because of their large size are not applicable at the small rivers and at medium sized rivers during periods of low water level. On these rivers proposed to use barge train, which dimensions are determined by the given river conditions. Their dimensions are determined by the number of containers or barge module (BM) installed in the barge train. Engineering valuations of a BM and barge train are based on information concerning water resistance to motion of a body. The goal of the work: derivation of information for determining the parameters motion during acceleration of the BM. The method of investigation: experimental-theoretical. In the course of theoretical studies determination the factors that influence the process of acceleration of a BM in water and determine the value interval coefficient of imaginary mass increment (CIMI).

Experimental studies were carried out on model according to the quadric plan. The regression model of the interval coefficient of imaginary mass increment (CIMI) of a BM during its acceleration were worked out. Cognition of the coefficient allows to determine the parameters motion of a BM in the mentioned conditions. As a result of the analysis of the model, it was established that the interval coefficient of imaginary mass increment (CIMI) Φ linearly increases with increasing Froude number Fr . The intensity of this increase becomes larger with increasing draught of BM, that is, with a decrease in its relative width. The increase of relative length of the BM causes decrease of the coefficient Φ . It also decreases with increasing degree of completeness process of acceleration. The influence degree and pattern of the determining factors depend significantly on their interaction. To estimate this influence it is possible to perform calculations corresponding to a certain combination of factors.

Keywords: floating container, barge module, experimental research, non-stationary motion, water resistance, speed, timber transport, coefficient.

КУДРЯВЦЕВ Геннадий Владимирович – ассистент Высшей инженерной школы Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова. SPIN-code: 2193-1790.

163002, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия. E-mail: g.kudryavcev@narfu.ru

KUDRYAVTSEV Gennadii V. – assistant, Higher engineering school, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. SPIN-code: 2193-1790.

163002. Severnoj Dviny emb. 17. Arkhangelsk. Russia. E-mail: g.kudryavcev@narfu.ru

ПОСЫПАНОВ Сергей Валентинович – доцент Высшей инженерной школы Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова, доктор технических наук. SPIN-код 8592-0690.

163002, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия. E-mail: s.posypanov@narfu.ru

POSPANOV Sergey V. – DSc (Technical), associate Professor, Higher engineering school, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. SPIN-code: 8592-0690.

163002. Severnoj Dviny emb. 17. Arkhangelsk. Russia. E-mail: s.posypanov@narfu.ru