

**В.О. Чупраков, С.В. Посыпанов**

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ  
МОБИЛЬНОГО МАЛОГАБАРИТНОГО ПРИЧАЛА  
С ВОДНОЙ СРЕДОЙ ПРИ ЕГО БУКСИРОВКЕ**

*Введение.* При наличии больших запасов древесного сырья в основных лесных регионах Российской Федерации перерабатывающие предприятия, в том числе и находящиеся в этих же регионах, зачастую испытывают дефицит в этом сырье. Наиболее близкие к перерабатывающим предприятиям и транспортным магистралям лесные массивы уже освоены. Значительная часть спелых и перестойных лесов находятся на очень большом удалении от промышленных центров. Древесина, находящаяся в этих лесах, зачастую является экономически недоступной при сухопутном варианте доставки. Дорожная сеть развита в указанных регионах довольно слабо. В условиях огромных, часто заболоченных территорий, при большом количестве водных преград строительство дорог обходится очень дорого. Расстояния перевозки древесного сырья очень велики. В таких условиях решению транспортной проблемы в значительной степени может способствовать более активное вовлечение в эксплуатацию густой речной сети основных лесных регионов. Водный транспорт, особенно при больших расстояниях транспортировки, может быть в несколько раз дешевле сухопутного. Для существенного увеличения объемов водного транспорта лесоматериалов необходимо использовать средние и малые реки, которые составляют основу указанной сети. При этом следует использовать экологически щадящие, разрешенные действующим Водным кодексом виды водного транспорта древесного сырья. К одному из основных видов такого транспорта относятся судовые перевозки.

В настоящее время погрузка лесоматериалов на суда в пунктах отправления осуществляется преимущественно с помощью плавкранов. При активном задействовании сети средних и малых рек ставка на указанный вариант погрузки будет неправильной. Плавкраны далеко не всегда можно будет доставить к месту погрузки из-за наличия на маршрутах низких мостов и по ряду других причин. Навигация на средних и малых реках довольно кратковременна. Затраты времени на доставку кранов к месту погрузки может занять значительную часть этой навигации и обойтись очень дорого. Потребность в большом количестве кранов будет иметь место в течение короткой

навигации и значительно снизится после ее завершения, то есть введение в эксплуатацию большого дополнительного количества плавкранов экономически неоправданно. Также экономически неоправданно строительство дорогих стационарных причалов с дорогим стационарным грузоподъемным оборудованием, поскольку пункты погрузки в рассматриваемых условиях будут рассредоточены, и возможно при больших общих объемах работ объемы перевалки грузов на каждом отдельно взятом пункте будут невелики.

Проблема погрузки лесоматериалов на суда в указанных условиях может быть решена с помощью предложенных авторами мобильных малогабаритных причалов. Их применение позволяет задействовать на перевалке лесоматериалов на суда погрузчики, используемые лесозаготовителями и соответственно имеющиеся в пунктах отправления в достаточном количестве. Конструкция мобильного малогабаритного причала и соответствующие технологические схемы погрузки подробно описаны в работе [Посыпанов, 2015]. Мобильные причалы могут перемещаться в рабочем створе вслед за изменяющимися уровнями воды, а также от одного пункта погрузки к другому, а после окончания навигации на малых и средних реках могут быть выведены на большую реку и использоваться там как на погрузке лесоматериалов, так и на выгрузке. Буксировка мобильных причалов от пункта к пункту предусматривается катером при пустых балластных емкостях (рис. 1) носовой (низкой) частью вперед.

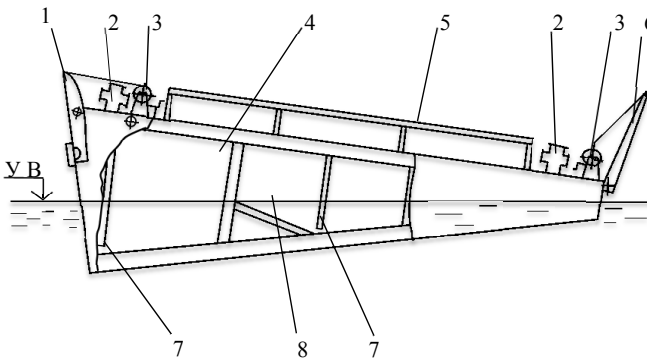


Рис. 1. Мобильный причал с пустыми балластными емкостями:  
 1 – аппарат-ограждение; 2 – кнехт; 3 – лебедка; 4 – балластная емкость выравнивающая; 5 – ограждение; 6 – аппарат; 7 – трубы для перекачки воды;  
 8 – емкость перестановочная

Fig. 1. Relocatable pontoon pier with empty ballast tanks: 1 – ramp-fencing; 2 – bollard; 3 – winch; 4 – leveling ballast tank; 5 – fencing; 6 – ramp; 7 – pipes for pumping water; 8 – permutation tank

Для выполнения предполагаемых транспортных расчетов при планировании мероприятий, связанных с буксировкой мобильных причалов, нужна информация о сопротивлении водной среды, возникающей в процессе их движения. Принимается во внимание, что суда, используемые на средних и малых реках, не обладают большой мощностью. Поэтому данные о величине указанного сопротивления должны быть достаточно точными, чтобы не привести к значительным погрешностям в означенных расчетах. Учитывая, что мобильные причалы предназначены, прежде всего, для небольших рек, в расчетах должно быть обязательно учтено влияние близко расположенного дна.

В ходе изучения состояния вопроса обнаружили множество публикаций, посвященных исследованиям перемещения разных объектов в воде. Существенный интерес у нас вызвали исследования, связанные с движением в водной среде лесотранспортных единиц. Результаты этих исследований опубликованы в работах [Корпачев, Рябоконе, 1978; Худонов, 1966; Чекалкин, 1981] и многих других. Приняты нами к сведению, разумеется, и работы, посвященные движению судов. К их числу относятся, например [Kleinstreuer, 2010; Larsson, Stern, Visonneau, 2014] и множество других. Отметим, что мобильный причал имеет форму менее обтекаемую по сравнению с формами корпусов судов. Это продиктовано главным образом его конструктивными особенностями, связанными с выполнением его функции в рабочем положении. От лесосплавных транспортных единиц мобильный причал отличается материалом поверхностей, контактирующих с водой, а также их местной конфигурацией. Форма его в транспортном положении более обтекаемая, чем у лесосплавных единиц. С учетом этого сделан вывод о целесообразности выполнения дополнительных исследований, которые позволили бы получить упомянутую выше информацию о сопротивлении воды. Описываемые далее исследования базируются на исследованиях, проведенных ранее предшественниками. Настоящая работа является развитием выполненных ранее работ применительно к мобильным причалам, буксируемым в условиях близости дна водоема.

*Цель работы* – обеспечение возможности определения расчетным путем гидродинамического сопротивления равномерному перемещению мобильного малогабаритного причала в транспортном положении, оценка влияния на это сопротивление определяющих факторов.

*Метод исследования* – экспериментально-теоретический.

Интересующее авторов гидродинамическое сопротивление зависит от размеров и формы подводной части буксируемого причала. За характер-

ный размер этой части приняли осадку причала. Ее безразмерными геометрическими параметрами могут являться габаритная ширина и длина, отнесенные к осадке, а также углы между донной и верхней, транцевой и верхней поверхностями.

Близко расположенное дно тоже влияет на величину исследуемого сопротивления. Близость дна обычно характеризуют глубиной воды на участке буксировки, отнесенной к осадке.

Гидромеханиками установлено (Войткунский, Фадеев, Федяевский, 1982)<sup>1</sup>, что сопротивление воды движению объекта в подобных случаях зависит от плотности и вязкости жидкости. Учитывается ими и ускорение свободного падения. Это обусловлено в частности тем, что при предполагаемом физическом моделировании для обеспечения подобия явлений [Родионов, 1982] требуется соблюсти правильное соотношение сил различной природы. Сопротивление зависит и от скорости буксировки мобильного причала относительно воды. Очевидно, что причал с целью уменьшения сопротивления движению целесообразно буксировать низкой частью вперед (рис. 1), то есть фактор направления движения изначально является фиксированным.

С учетом всего перечисленного для силы гидродинамического сопротивления равномерному движению мобильного причала  $R$ , составлена зависимость

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

где  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости жидкости, Па·с;  $v$  – скорость движения причала относительно воды, м/с;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $B, T, L$  – соответственно ширина причала, осадка и габаритная длина подводной части мобильного малогабаритного причала перед началом движения, м;  $\alpha, \beta$  – углы между транцевой и верхней, донной и верхней поверхностями причала, рад;  $H$  – глубина воды на участке буксировки, м.

Используя известную методику в работе [Родионов, 1982], перейдем от выражения (1) к соответствующей ему зависимости, состоящей только из безразмерных величин

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

<sup>1</sup> Войткунский Я.И. и др. Гидромеханика. Л.: Судостроение, 1982. 456 с.

Далее разделим обе части этого уравнения на ширину причала и умножим на удвоенную его осадку

$$\frac{R}{\frac{\rho \cdot v^2}{2} B \cdot T} = \frac{2T}{B} \cdot \varphi \left( 1; \frac{\mu}{\rho \cdot v \cdot T}; 1; \frac{gT}{v^2}; 1; \frac{B}{T}; \frac{L}{T}; \frac{H}{T}; \alpha; \beta \right). \quad (3)$$

Слева от знака равенства получим выражение, представляющее собой преобразованный вариант формулы Ньютона (Войткунский, Фадеев, Федяевский, 1982)<sup>1</sup>.

$$R = c \frac{\rho}{2} \Omega v^2, \quad (4)$$

где  $c$  – коэффициент общего сопротивления жидкости;  $\Omega$  – площадь миделевого сечения, м<sup>2</sup>.

В рассматриваемом случае площадь миделевого сечения

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

Имея в виду выражения (4), (5), несложно, удостовериться, что в левой части зависимости (3) находится величина равная коэффициенту общего сопротивления  $c$ . В механике жидкости (Войткунский, Фадеев, Федяевский, 1982)<sup>1</sup> часто используют критерии с такими названиями, как число Фруда

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gT}} \quad (6)$$

и число Рейнольдса

$$Re = \rho v T / \mu. \quad (7)$$

С учетом изложенных фактов представим выражение (3) в следующем виде:

$$c = \frac{2T}{B} \cdot \varphi \left( 1; \frac{1}{Re}; 1; \frac{1}{Fr^2}; 1; \frac{B}{T}; \frac{L}{T}; \frac{H}{T}; \alpha; \beta \right). \quad (8)$$

Изменим знак функции и приведем зависимость (8) к более компактному виду

$$c = \psi(Re; Fr; B/T; L/T; H/T; \alpha; \beta). \quad (9)$$

<sup>1</sup> Войткунский Я.И. и др. Гидромеханика. Л.: Судостроение, 1982. 456 с.

Согласно выражению (9) теоретически величина коэффициента  $c$  определяется семью факторами, приведенными в скобках. При таком количестве факторов получение зависимости (9) в явном виде требует очень большого количества трудоемких опытов. Эта зависимость будет очень громоздкой и вероятно с невысокой достоверностью аппроксимации. Факторы  $B/T$ ;  $L/T$ ;  $\alpha$ ;  $\beta$  определяют форму подводной части причала. Отметим, что ранее, исходя из ряда технических и технологических требований, установлены размеры и форма базового варианта причала, его масса. Установили также, что в зависимости от назначения размеры причала могут быть разными, однако соотношение размеров, то есть форма причалов и соответственно форма подводных частей причалов будут достаточно стабильными. С учетом этого факторы  $B/T$ ;  $L/T$ ;  $\alpha$ ;  $\beta$  в данном случае являются фиксированными.

Учли, что мобильный причал является плохообтекаемым телом, зоны отрыва пограничного слоя жидкости у которого фиксированы (Войткунский, Фадеев, Федяевский, 1982)<sup>1</sup>. Таковыми зонами у него являются ребро между донной и транцевой поверхностями причала, ребра между боковыми и транцевой поверхностями. Известно в учебнике (Войткунский, Фадеев, Федяевский, 1982)<sup>1</sup>, что при движении в воде тел, относящихся к указанной группе, число Рейнольдса очень слабо влияет на величину коэффициента  $c$ . Поэтому этим влиянием принято пренебрегать.

Принимая во внимание представленную информацию, зависимость (9) заменим более простой

$$c = \gamma(Fr; H/T). \quad (10)$$

Получение аналитической расчетной формулы, соответствующей выражению (10), не представляется возможным. Поэтому формулу для вычисления коэффициента  $c$  решено было получить по экспериментальным данным.

Мобильного причала натуральной величины пока в наличии нет. Его изготовление требует существенных по меркам экспериментаторов затрат. В связи с этим исследования проводили на модели, изготовленной в масштабе 1:20. Он был принят исходя из натурных размеров [Посыпанов, 2015] мобильного причала и размеров бассейна, в котором выполнялись эксперименты.

Согласно выражению (10) величины  $Fr$  и  $H/T$  – критерии подобия при моделировании.

<sup>1</sup> Войткунский Я.И. и др. Гидромеханика. Л.: Судостроение, 1982. 456 с.

Диапазон варьирования числа Фруда принят исходя опять же из указанных размеров мобильного причала, а также предполагаемого диапазона скоростей его буксировки – 0,5...1,5 м/с. Диапазон скоростей буксировки модели назначен исходя из требования соответствия критерия  $Fr$  в модельных условиях его натурным величинам. Относительную глубину  $H/T$  варьировали в интервале 1,5...4,0, учитывая, что обычно для большинства судов и лесотранспортных единиц при относительной глубине более 4 дно не влияет на силу сопротивления или это влияние весьма незначительно [Вайткунский, 1988; Корпачев, Рябоконь, 1978].

Перемещение модели мобильного причала обеспечивалось буксировочной системой, представляющей собой кордовую нить, огибающую блоки, к концам которой прикреплены чаши для грузов. Устанавливая в чаши грузы разной массы, варьировали величину тягового усилия, а следовательно, и скорость перемещения модели.

Для определения скорости модели причала использовали бесконтактный датчик ВС-401, установленный у блока с метками, отражающими свет. Прохождение каждой метки у датчика вызывает генерирование им сигнала. Для усиления этих аналоговых сигналов и преобразования их в цифровые использовали соответствующие блоки. После прохождения через эти блоки сигналы поступали на ноутбук, на котором была установлена программа «ZETLAB». Она выдавала частоты сигналов с интервалом в 1 секунду для всего временного отрезка движения модели. Эти данные обрабатывали, используя макрос, написанный в «MS Office Excel», благодаря которому получали графики зависимостей скорости буксировки модели от текущего времени и соответствующие таблицы. По ним и определяли скорость равномерного движения, фигурирующую в формуле (4). Выразив из этой формулы коэффициент  $c$ , получили выражение, с помощью которого и вычисляли опытные значения этой величины. При этом площадь миделевого сечения находили по формуле (5). Величина  $R$  при равномерном движении равна силе, приложенной от буксировочной системы. Эту силу определяли по массам грузов.

Напомним о данной выше характеристике причала в плане его обтекаемости. Отметим также, что площадь трения у него не превышает площади миделевого сечения даже на порядок. У таких объектов сопротивление трения составляет очень небольшую часть от общего гидродинамического сопротивления [Чекалкин, 1981]. В связи с этим используемый иногда пересчет модельных коэффициентов сопротивления на натурные, предусматривающий поправку по сопротивлению трения, здесь нецелесообразен.

Учитывая результаты ранее выполненных исследований, изначально ориентировались на получение для коэффициента  $c$  регрессионного уравнения второго порядка. Поэтому для проведения опытов был принят полный факторный план того же порядка [Пижури, 2005]. Предварительно провели пробную серию опытов. Убедились в нормальности распределения получаемых результатов. Определили коэффициент вариации по пробной серии. Допустимую относительную погрешность приняли равной 5%, уровень значимости – 0,05. Выполнив расчет по известной формуле [Пижури, 2005], количество повторений каждого опыта приняли равным 5.

Применив  $G$ -критерий Кохрена, смогли принять гипотезу об однородности дисперсий опытов [Пижури, 2005].

При регрессионном анализе использованы методы «Пошаговый» и «Ввод». Получили соответственно два уравнения регрессии, несущественно отличающиеся по достоверности аппроксимации. Приводим здесь одну из моделей

$$c = 1,213 - 0,466 \frac{H}{T} + 0,559 Fr + 0,058 \left( \frac{H}{T} \right)^2 + 0,032 Fr^2 - 0,077 \frac{H}{T} Fr. \quad (11)$$

Достоверность аппроксимации данного уравнения регрессии [Weisberg, 2005] весьма высокая –  $R^2 = 0,93$ .

Описанная статистическая обработка реализована с помощью программы «IBM SPSS Statistica».

Использование приведенной модели совместно с выражениями (4), (5) дает возможность вычислять силу сопротивления водной среды равномерному движению мобильного малогабаритного причала.

*Интерпретация результатов.* Наличие модели (11) также дает возможность оценить степень и характер влияния числа Фруда и относительной глубины на выходную величину. С увеличением числа Фруда от нижней границы принятого диапазона до верхней увеличивается в данном случае на 20..25% и коэффициент  $c$  (рис. 2). Это отличие от многих лесосплавных единиц обусловлено более высокими скоростями буксировки мобильного причала. Увеличение же скоростей и соответственно числа  $Fr$  связано с возрастанием волнового сопротивления [Войткунский, 1988]. Причал в этом плане ближе к тихоходным судам. Отметим, что у судов коэффициент сопротивления тоже меняется с изменением числа Фруда.

По графикам видно, что с уменьшением относительной глубины увеличение коэффициента  $c$  в рассматриваемом случае в абсолютном выражении происходит несколько интенсивнее.



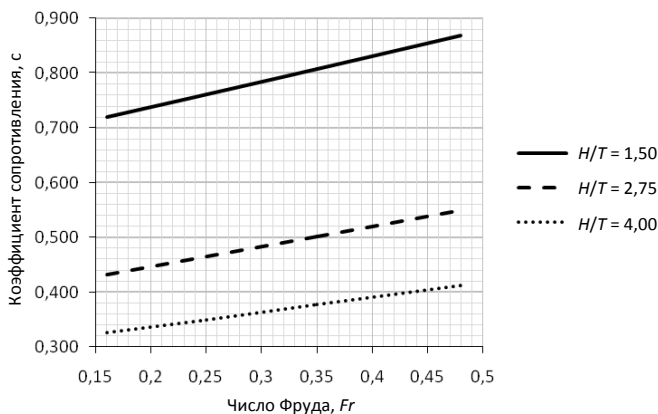


Рис. 2. Графики зависимости коэффициента  $c$  от  $Fr$

Fig. 2. Graphs of dependence of the coefficient  $c$  on  $Fr$

При наличии в уравнении (11) значимого коэффициента при  $Fr^2$  зависимость от числа Фруда, судя по графикам, в данном случае близка к линейной.

Зависимость коэффициента  $c$  от относительной глубины отражают графики, представленные на рис. 3.

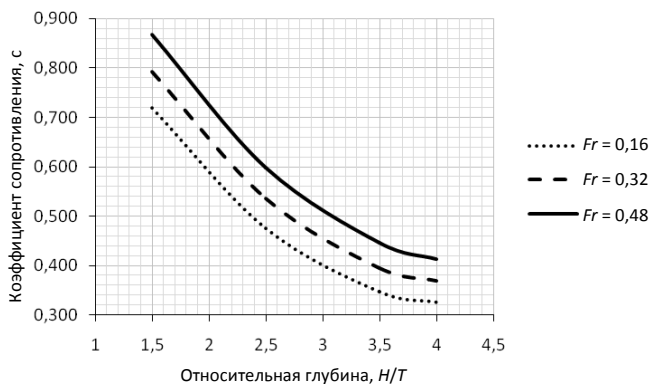


Рис. 3. Графики зависимости коэффициента  $c$  от  $H/T$

Fig. 3. Graphs of dependence of the coefficient  $c$  on  $H/T$

С уменьшением относительной глубины коэффициент сопротивления воды движению причала существенно увеличивается. Относительная глубина по сравнению с числом Фруда значительно сильнее влияет на выходную величину в рассматриваемых диапазонах факторов. Уменьшение относительной глубины от 4,0 до 1,5 приводит к увеличению коэффициента сопротивления на 110...120%. Столь существенное влияние мелководья здесь может объясняться тем, что в отличие от других случаев поток под днищем мобильного причала попадает в постепенно сужающую область, что приводит к более значительному увеличению его относительной скорости в задней части причала.

В абсолютном выражении приращение величины коэффициента сопротивления при уменьшении глубины несколько больше при больших числах Фруда.

*Выводы.* Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили получить регрессионную модель для вычисления коэффициента сопротивления равномерному перемещению мобильного малогабаритного причала в воде в транспортном положении. Использование полученной модели совместно с формулами (4), (5) предоставляет возможность определения силы сопротивления воды движению причала при его буксировке.

Основными факторами, определяющими величину упомянутого коэффициента, в данном случае являются относительная глубина водоема  $H/T$  и число Фруда  $Fr$ . Более значимым фактором является относительная глубина водоема. При ее уменьшении от 4,0 до 1,5 коэффициент сопротивления увеличивается на 110...120%. Увеличение числа Фруда и соответственно скорости движения причала от нижних до верхних границ исследованных диапазонов вызывает возрастание коэффициента сопротивления на 20...25%.

Результаты выполненной работы обеспечивают возможность выполнения расчетов, предполагаемых при реализации мероприятий, связанных с мобильными причалами, использование которых позволит активизировать судовые перевозки древесного сырья по средним и малым рекам и соответственно снизить остроту транспортной проблемы в лесной промышленности.

### Библиографический список

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

Корпачев В.П., Рябоконт Ю.И. Сопротивление воды движению лесотранспортных единиц в водном потоке. Красноярск: РИО СТИ, 1978. 62 с.

Пижурин А.А. Основы научных исследований в деревообработке. М: МГУЛ, 2005. 305 с.

*Посыпанов С.В.* Технологические схемы погрузки лесоматериалов на суда с использованием мобильного малогабаритного причала//Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика: сб. науч. тр. по матер. Междунар. заоч. науч.-практ. конф. 15–17 апреля / ВГЛТА. Воронеж, 2015. Вып. 2, ч.2 (13 – 2). С. 313–318.

*Родионов П.М.* Метод подобия и его применение к решению задач лесосплава. Л.: ЛТА, 1982. 84 с.

*Худоногов В.Н.* Гидродинамическое взаимодействие плотов и внешней среды: монография. Сибирский технологический институт. Красноярск: Красноярское кн. изд-во, 1966. 226 с.

*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

*Voytkunskiy Ya.I.* Soprotivleniye dvizheniyu sudov. Leningrad: Sudostroyeniye, 1988. 288 s. (In Russ.)

*Korpachyov V.P., Ryabokon' Yu.I.* Soprotivleniye vody dvizheniyu lesotransportnykh yedinit v vodnom potoke. STI: Krasnoyarsk, 1978. 62 p. (In Russ.)

*Pizhurin A.A.* Osnovy nauchnykh issledovaniy v derevoobrabotke. Moscow: MGUL, 2005. 305 p. (In Russ.)

*Posypanov S.V.* Tekhnologicheskie skhemy pogruzki lesomaterialov na suda s ispol'zovaniem mobil'nogo malogabaritnogo prichala. Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika: sb. nauch. tr. po mater. mezhdunar. zaoch. nauch.-prakt. konf. Voronezh: VGLTA, 2015, is. 2, ch. 2 (13-2), pp. 313–318. (In Russ.)

*Rodionov P.M.* Metod podobija i yego primeneniye k reshениyu zadach lesoplava. LTA: Leningrad, 1982. 84 p. (In Russ.)

*Khudonogov V.N.* Gidrodinamicheskoye vzaimodeystviye plotov i vneshney sredy: monografiya. SIBTI: Krasnoyarsk, 1966. 226 p. (In Russ.)

*Chekalkin K.A.* Dvizheniye tverdykh tel v zhidkosti. Leningrad: LTA, 1981. 48 p. (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 02.11.2020*

**Чупраков В.О., Посыпанов С.В.** Результаты исследования взаимодействия мобильного малогабаритного причала с водной средой при его буксировке // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2020. Вып. 233. С. 152–165. DOI: 10.21266/2079-4304.2020.233.152-165

Использование мобильных малогабаритных причалов дает возможность при снижении затрат организовать погрузку лесоматериалов на суда в пунктах отправления с помощью техники лесозаготовителей. Это создает предпосылки для существенного увеличения объемов перевозки лесоматериалов более дешевым водным транспортом, обеспечивает экономическую доступность древесного сырья, основная часть которого находится в удаленных лесных массивах. Предполагается, что при эксплуатации мобильных причалов они нередко будут перемещаться с одного пункта погрузки на другой в условиях небольших рек с помощью судов малой мощности. Для выполнения расчетов, связанных с указанным перемещением, нужны достаточно точные сведения о сопротивлении воды движению причалов при наличии влияния дна. При теоретическом исследовании установили факторы, влияющие на величину сопротивления воды равномерному перемещению причала. Представили соответствующую зависимость в символьном виде. Преобразовали ее, получив зависимость в безразмерном виде. Обосновали возможность исключения из числа определяющих факторов числа Рейнольдса и целесообразность фиксирования факторов, характеризующих форму подводной части причала. Полученное в результате символьное решение – зависимость коэффициента сопротивления воды от относительной глубины и числа Фруда. Опираясь на нее, провели эксперименты на модели с обеспечением физического подобия. По данным эксперимента получена регрессионная модель, позволяющая вычислять коэффициент сопротивления воды равномерному движению причала, а по величине этого коэффициента определять с использованием формулы Ньютона значение силы сопротивления. Анализируя регрессионную модель, установили, что изменение скорости буксировки относительно воды от 0,5 до 1,5 м/с и соответственно числа Фруда приводит к увеличению коэффициента сопротивления на 20...25%. Изменение относительной глубины от 4,0 до 1,5 вызывает увеличение указанного коэффициента на 110...120%. Столь существенное влияние мелководья в данном случае объяснили наличием постепенно сужающей области между днищем причала и дном водоема, что приводит к более значительному увеличению относительной скорости в задней части причала. Полученная информация дает возможность наилучшим образом спланировать мероприятия, связанные с буксировкой причалов от одного пункта перевалки грузов к другому.

**Ключевые слова:** круглые лесоматериалы, мобильный причал, сопротивление воды, судовые перевозки, погрузка лесоматериалов.

**Chuprakov V.O., Posypanov S.V.** Research findings of an relocatable small size pontoon pier interaction with the aquatic medium during its towing. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2020, is. 233, pp. 152–165 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2020.233.152-165

Appliance of the relocatable small-sized pontoon piers allows to use the logging machinery for loading of the round wood at the sites of shipment. It enables to increase volumes of the timber transportation volumes using relatively unexpensive water transport and provides better access to the raw wood resources placed at the remote wood stands. It is suggested that the mobile pontoon piers will be replaced from one loading site at the small-scale shallow river to another, using the small-sized tugboats. In order to make projections of these towing operations, the reliable information regarding water resistance to the pontoons motion is needed, taking into consideration the low depths conditions. The named circumstances justify necessity of the mentioned research. As a part of the theoretical study, the factors affecting the resistance of water to uniform velocity motion of a pontoon were characterized. The corresponding dependence was presented in the symbolic and dimensionless forms. The reasons for exclusion of the Reynolds number and fixing of the of a pontoon underwater body patterns were justified. The resulting symbolic form establishes dependence of water resistance coefficient from relative depth and the Froude number. Based upon the developed equation, the model experiments were proceeded. The regression model for calculation of the resistance coefficient and consequently, using the Newton equation, the force of hydraulic drag – was developed. Variation of the towing speed (related to water) from 0.5 to 1.5 m/sec. and, consequently, increase of the Froude number, lead to 20...25% raise of the coefficient of resistance. The relative depth decrease from 4.0 to 1.5 causes 110...120% increase of the mentioned coefficient. Such a sufficient impact of shallowness is explained by increase of the relative velocity in the afterbody zone of a pontoon. The acquired information allows to improve planning of towing operations during relocation of the pontoon piers from one loading site to another.

**Key words:** round wood, relocatable pier, water resistance, shipping, timber loading.

---

**ЧУПРАКОВ Вячеслав Олегович** – аспирант Высшей инженерной школы Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова. 163002, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия. E-mail: slav.tchupr@yandex.ru

**CHUPRAKOV Vyacheslav O.** – PhD student, Higher engineering school, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. 163002. Severnoj Dviny emb. 17. Arkhangelsk. Russia. E-mail: slav.tchupr@yandex.ru

**ПОСЫПАНОВ Сергей Валентинович** – профессор Высшей инженерной школы Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова, доктор технических наук, доцент. ORCID: 0000-0003-0600-7089. SPIN-код 8592-0690

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

**POSYPANOV Sergey V.** – DSc (Technical), Professor, Higher engineering school, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. ORCID: 0000-0003-0600-7089. SPIN-code: 8592-0690

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