

С.В. Посыпанов, Ш.Г. Зарипов, И.А. Песков

**ОБОСНОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК,
ВОСПРИНИМАЕМЫХ УСТРОЙСТВОМ
ДЛЯ СПЛОТКИ ЧЕТЫРЁХПАКЕТНЫХ ПУЧКОВ
В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Введение. Доставка древесного сырья потребителям из наиболее удалённых лесных массивов, где сосредоточены его основные запасы, зачастую экономически оправдывается только при осуществлении её по водным путям. При этом важно эффективно использовать разветвлённые речные сети лесных регионов. Эта разветвлённость обеспечивается в значительной степени большим количеством малых и средних рек. Как правило, начальный мелководный участок составляет небольшую часть всей длины маршрута транспортировки лесоматериалов. В связи с этим после прохождения такого участка целесообразно увеличение размеров лесотранспортных единиц как в плане, так и по высоте с целью уменьшения удельных затрат, связанных с последующей буксировкой. Доставка древесного сырья по речным сетям, организованная по принципу единого транспортного пакета [Харитонов, Посыпанов, 2008], предполагает не только повышение эффективности этого процесса, но и лучшее соответствие критерию экологичности. При такой доставке на начальном мелководном участке лесоматериалы транспортируют в малогабаритных пакетах объёмом 3–5 м³. После прохождения такого участка из них формируют двухъярусные четырёхпакетные пучки. Целостность пакетов при этом не нарушается, что исключает потери лесоматериалов, обеспечивает высокую производительность и технологичность сплотки. Возможность укладки в одну сплоточную единицу пакетов с большим и малым запасом плавучести создаёт хорошие предпосылки для осуществления транспортировки по воде лиственных и хвойных тонкомерных сортиментов.

Отметим, что двухъярусные единицы в течение ряда лет проходили апробацию в производственных условиях. Апробация оказалась успешной, но пока их сплотка осуществлялась только на зимних плотбищах. Применение этих сплоточных единиц по основному назначению возможно только при наличии устройств, обеспечивающих возможность их формирова-

ния на воде. Авторами статьи разработано соответствующее устройство относительно простой конструкции, позволяющее осуществлять сплотку рассматриваемых единиц с помощью техники, имеющейся у лесозаготовителей. Сведения о конструкции устройства, технологии работ, выполняемых с его использованием, приведены в статье [[Посыпанов, Песков, 2018]. Здесь ограничимся лишь краткой информацией о нём, которая нужна для понимания излагаемого в данной работе материала. Схематичное изображение устройства (вид сверху) приведено на рис. 1.

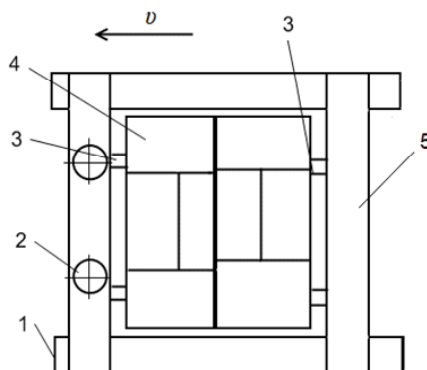


Рис. 1. Схема устройства:

1 – понтон; 2 – выюха; 3 – отсекатель;
4 – пакет лесоматериалов, 5 – мостик

Fig. 1. Device diagram:

1 – pontoon; 2 – coil; 3 – cut-off;
4 – package of timber, 5 – bridge

Плавучее основание устройства состоит из двух понтонных, соединённых по краям мостиками. На мостиках установлены поднимаемые отсекатели, между которыми находится рабочая камера. По бокам рабочую камеру ограничивают закреплённые на понтонах щиты (на рис. 1 не показаны), поднимаемые при транспортировке устройства. Они предотвращают выход пакетов нижнего яруса за пределы рабочей камеры. На нижнем по течению мостике установлены выюхи с проволокой, используемой для обвязки сформированной сплоточной единицы.

Пакеты нижнего яруса заводят в устройство по воде после поднятия верхних по течению отсекателей. Затем отсекатели опускают и погружают

ком укладывают на нижний ярус верхние пакеты. Сформированную плотную единицу обвязывают и, подняв нижние по течению отсекатели, погружатком вытаскивают из рабочей камеры. Возможны другие варианты работы.

Эксплуатация устройств предполагается преимущественно в период подъёма уровней на реках, то есть при существенных скоростях течения. Высока вероятность перемещения устройств с места на место в связи с относительно небольшими объёмами работ на отдельных объектах. На каждом объекте предусматривается крепление устройства. В таких условиях особенно важно минимизировать затраты на его обеспечение. При этом крепление должно быть надёжным. Добиться этого можно лишь при наличии достаточно точной информации об усилиях, действующих на эксплуатируемое устройство со стороны набегающего потока. Выполнив анализ исследований по взаимодействию различных объектов с водной средой, в частности [Корпачев, Рябоконь, 1978; Чекалкин, 1981; Войткунский, 1988], мы убедились в необходимости описываемой здесь работы.

Цель исследования – научное обоснование величины гидродинамических усилий, воспринимаемых устройством для сплотки двухъярусных чётырёхпакетных сортиментных пучков, в процессе эксплуатации.

Метод исследования – теоретико- экспериментальный.

Теоретически нагрузка F , воспринимаемая зафиксированным в русле водоёма устройством от набегающего потока, зависит от большого количества факторов. К их числу следует отнести форму и размеры подводной части самого устройства и находящейся в его рабочей камере сплочной единицы. В этот перечень входит также скорость набегающего потока u . В соответствии с классическими положениями гидромеханики [Войткунский и др., 1982; Kleinstreuer, 2010] влияние оказывают плотность ρ и вязкость μ жидкости, в данном случае воды, а также величина гравитационной постоянной g . Сказывается на величине рассматриваемой нагрузки и близко расположенное дно. Зависимость означенной нагрузки от перечисленных факторов целесообразно привести к безразмерному виду, воспользовавшись положениями теории размерностей и подобия [Родионов, 1982]. Это позволяет существенно сократить количество определяющих факторов, упростив таким образом дальнейшие действия. Кроме того, при этом устанавливаются критерии подобия, необходимые в случае проведения экспериментов на моделях. В таких случаях форму и размеры объектов характеризуют одним абсолютным размером и группой относительных. В нашем случае за такой абсолютный размер принята осадка устройства T

с размещённой в ней сплоточной единицей. В качестве примера отметим, что такую геометрическую характеристику, как глубина потока H в месте расположения устройства, мы заменили безразмерной относительной глубиной H/T . При принятых параметрах устройства и базового варианта сплоточной единицы факторы, характеризующие форму и размеры их подводной части, являются фиксированными. Следовательно, из рассматриваемой зависимости они могут быть исключены.

Выполнив ряд действий по приведению указанной зависимости к безразмерному виду, получили:

$$\frac{F}{\rho \cdot v^2 T^2} = \gamma \left(\frac{\mu}{\rho v T}; \frac{gT}{v^2}; \frac{H}{T} \right). \quad (1)$$

При фиксированных соотношениях осадки T с другими геометрическими характеристиками устройства и сплоточной единицы площадь мидела Ω пропорциональна квадрату осадки. Коэффициент пропорциональности обозначили символом k . Умножили левую и правую части уравнения (1) на величину $2/k$, в результате получили:

$$\frac{2F}{\rho \cdot v^2 \Omega} = \frac{2}{k} \gamma \left(\frac{\mu}{\rho v T}; \frac{gT}{v^2}; \frac{H}{T} \right). \quad (2)$$

Первое выражение в скобках зависимости (2) – преобразованный вариант числа Рейнольдса Re , второе – числа Фруда Fr [Войткунский и др., 1982].

$$Re = \frac{\rho v T}{\mu}; \quad (3)$$

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gT}}. \quad (4)$$

Дробь в левой части указанной зависимости равна величине, которую принято называть коэффициентом гидродинамического сопротивления. Обозначим его символом c . Уравнение (2) записали иначе:

$$c = \frac{2}{k} \gamma \left(\frac{1}{Re}; \frac{1}{Fr^2}; \frac{H}{T} \right). \quad (5)$$

Выражение (5) привели к более простому виду, поменяв знак функции:

$$c = \beta \left(Re; Fr; \frac{H}{T} \right). \quad (6)$$

Вновь обратившись к левой части уравнения (2), запишем формулу, которую будем использовать для определения исследуемой гидродинамической нагрузки:

$$F = c\rho\Omega v^2 / 2. \quad (7)$$

В данном случае под площадью миделя понимается суммарная площадь подводной части поперечного сечения плавучего основания устройства и сплottedной единицы, размещённой в его рабочей камере.

Чтобы зависимость (6) представить в виде математического выражения, с помощью которого можно было бы вычислять значения коэффициента гидродинамического сопротивления c , потребовалось проведение экспериментальных исследований. Проведение натурных экспериментов в данном случае весьма затруднительно, поэтому прибегли к физическому моделированию. Полученные безразмерные комплексы в скобках уравнения (6), как было отмечено, являются критериями подобия при указанном моделировании. Известно, что обеспечить подобие по числам Re и Fr одновременно практически невозможно [Войткунский и др., 1982]. Из выражений (3), (4) следует, что при проведении опытов в воде в первом случае модельную скорость необходимо увеличивать по сравнению с натурной, во втором – уменьшать. Согласно существующей классификации [Войткунский и др., 1982] исследуемое устройство, в особенности со сплottedной единицей в рабочей камере, следует отнести к плохобтекаемым телам, причём места отрыва пограничного слоя в данном случае являются фиксированными. В результате исследований, проведённых с такими телами, установлено, что составляющая трения в общем гидродинамическом сопротивлении у них незначительна [Чекалкин, 1981; Войткунский и др., 1982]. Число Re влияет в основном именно на эту составляющую, то есть здесь оно является фактором, слабо влияющим на результат. Поэтому, изменив знак функции, можем упростить зависимость (6):

$$c = \delta\left(Fr; \frac{H}{T}\right). \quad (8)$$

Таким образом, требовалось провести двухфакторный эксперимент. Определяющие факторы одновременно являются критериями подобия.

Модель плавучего основания устройства изготовили из оцинкованной стали в масштабе 1:20. Длина понтонов модели 300 мм, ширина 75 мм, высота 50 мм, расстояние между ними 320 мм. Осадка модели при опущенных боковых щитах 80 мм, осадка понтонов 25 мм.

Подобие по критерию Фруда при указанном масштабе модели достигается в соответствии с формулой (4) при условии, что скорости в модельных условиях будут меньше натуральных в $\sqrt{20} = 4,47$ раза.

Экспериментальные исследования проводили на небольшом водотоке, имеющем связь с морем. Из-за приливов и отливов скорость течения в месте проведения опытов периодически менялась. Это изменение происходило достаточно медленно, то есть при дублировании опытов скорость оставалась практически неизменной.

Экспериментальную установку фиксировали в русле реки при помощи металлических сваяк (рис. 2). Две свайки, расположенные выше по течению, предназначены для крепления балки, снабженной двумя кронштейнами, на которых закрепляли направляющие блоки. Под верхним блоком на кронштейне фиксировали электронные весы, на которые устанавливали груз. Исследуемую модель соединяли с этим грузом при помощи кордовой нити, огибающей указанные направляющие блоки. Положение весов с грузом было таковым, что ветвь кордовой нити, идущая от него к верхнему направляющему блоку, была вертикальной. В рабочей камере устройства размещали модель двухъярусного четырёхпакетного сортиментного пучка (рис. 3), изготовленную в соответствующем масштабе. Размеры этой модели приняты по базовому варианту натурной сплочной единицы [Харитонов, Посыпанов, 2008].

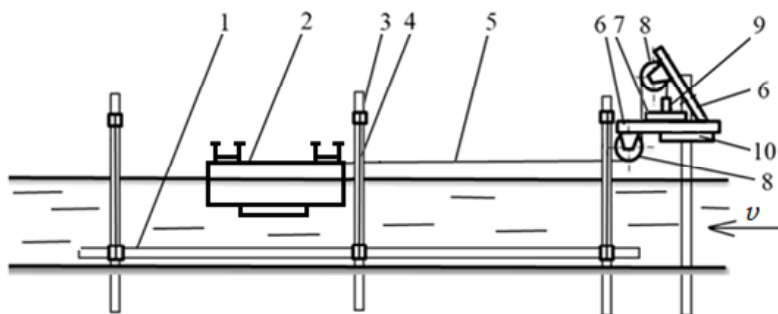


Рис. 2. Экспериментальная установка:

- 1 – донный щит; 2 – исследуемая модель; 3 – свайка; 4 – гибкая связь подвески щита;
5 – нить крепления модели; 6 – консоль; 7 – весы; 8 – блок; 9 – груз; 10 – балка

Fig. 2. Experimental setup:

- 1 – bottom shield; 2 – model under study; 3 – pile; 4 – flexible connection
of the shield suspension; 5 – fastening thread of the model; 6 – console; 7 – scales;
8 – block; 9 – cargo; 10 – beam

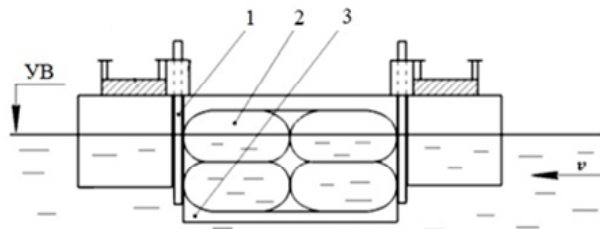


Рис. 3. Расположение четырёхпакетного пучка в устройстве:

1 – отсекаль; 2 – четырёхпакетный пучок; 5 – щит

Fig. 3. Location of the formed four-packet bundle in the device:

1 – cut-off; 2 – four-packet bundle; 3 – shield

Влияние близости дна исследовали с помощью утяжелённого горизонтального щита с размерами $3,75 \times 2,5$ м. По боковым краям щита выполнены отверстия, по три с каждой стороны. В них размещались сваи. Щит соединяли с верхними концами свай гибкими связями. Изменяя их длину, устанавливали требуемую глубину над щитом.

Измерение скорости течения выполняли с помощью гидрометрической вертушки ГР-21М.

Усилие, воспринимаемое моделью от потока воды, устанавливали с помощью весов. Снимали показания по ним при откреплённой модели, затем – при присоединённой, находящейся под воздействием потока. Определяли их разность с точностью 0,01 г. Результат переводили в килограммы и, умножив его на ускорение свободного падения, вычисляли искомую нагрузку в ньютонах. Используя полученные опытным путём данные и выражение (7), находили соответствующие величины коэффициента c .

Опыты проводили, ориентируясь на получение регрессионной модели второго порядка. При двух варьируемых факторах в случае использования полного факторного плана требуемое количество серий опытов равно 9 [Пижури, 2005]. Каждая серия опытов предусматривала пять повторений. Количество повторений установлено с учётом значения, вычисленного по известной формуле [Пижури, 2005]. Перед её использованием провели пробную серию опытов. При статистической обработке её результатов получили коэффициент вариации, равный 4,69%. Задали уровень значимости 0,05, допустимую погрешность 5%. При числе степеней свободы 9 критерий Стьюдента $t = 2,26$ [Пижури, 2005]. В результате упомянутого вычисления и установили требуемое количество повторений. В итоге общее количество опытов оказалось равным 45. Опыты пробной серии не входят в это число.

Упомянутый план предполагает трёхуровневое варьирование факторов. Число Фруда варьировали в диапазоне 0,108–0,192. Он обеспечивается

в данном случае при натуральных скоростях 0,445–0,800 м/с, при модельных – 0,100–0,179 м/с. Диапазон относительной глубины – 1,93–2,61.

В ходе первичной статистической обработки результатов по сериям опытов установили, в частности, что коэффициент вариации не превышает 4,79%, показатель точности – 2,14%. Это свидетельствует о достаточно качественном проведении экспериментов. Критерий Кохрена расчётный – 0,32, табличное значение – 0,36 [Пижури, 2005]. Данное соотношение расчётного и табличного значений позволяет считать дисперсии опытов однородными. Проверку на нормальность распределения выполнили для пробной серии по критерию Шапиро-Уилка. Убедились, что указанное распределение можно считать нормальным. При этом использовали программу «IBM SPSS Statistics».

Результаты выполненных проверок позволили воспользоваться регрессионным анализом. Его реализовали также с использованием программы «IBM SPSS Statistics». Выполнив обработку экспериментальных данных по методу «Ввод», получили следующее уравнение регрессии:

$$c = 1,726 - 0,989 \frac{H}{T} + 2,572 Fr + 0,148 \left(\frac{H}{T} \right)^2 - 6,107 Fr^2 + 0,307 \frac{H}{T} Fr. \quad (9)$$

Соответствующая ему достоверность аппроксимации – 0,809 [Weisberg, 2005].

При использовании метода «Пошаговый» получили более простую модель:

$$c = 0,998 - 0,271 \frac{H}{T} + 1,436 Fr. \quad (10)$$

Достоверность аппроксимации у неё оказалась, естественно, несколько ниже, чем у предыдущей, а именно 0,769.

Использование полученных уравнений совместно с формулой (7) даёт возможность определить гидродинамическую нагрузку на исследуемое устройство, находящееся в рабочем положении со сформированной сплошной единицей в рабочей камере.

Интерпретация результатов. Наличие регрессивных моделей позволяет выполнить анализ влияния основных определяющих факторов на величину коэффициента гидродинамического сопротивления. Очевидно, что этот анализ будет более достоверным в случае использования уравнения (9). Наглядно демонстрируют влияние определяющих факторов на выходную величину графики, построенные с применением указанной модели и представленные на рис. 4, рис. 5. Коэффициент гидродинамического сопротивления с увеличивается с возрастанием числа Фруда (рис. 4), причём

интенсивность этого увеличения с приближением к верхней границе исследованного диапазона Fr несколько снижается. При изменении числа Фруда от 0,108 до 0,192 коэффициент c увеличивается на 17–29%. Этот диапазон обусловлен различием относительных глубин.

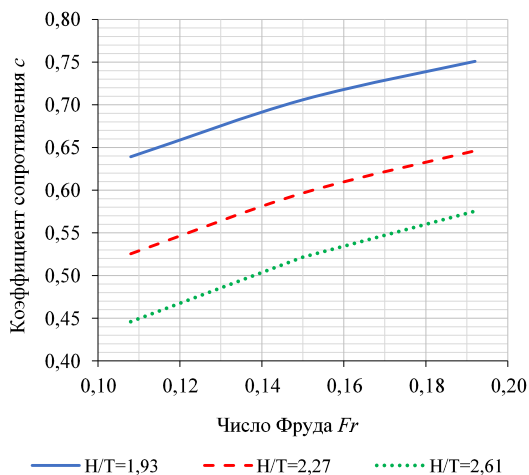


Рис. 4. Зависимость коэффициента c от числа Fr
Fig. 4. Dependence of coefficient c on the number Fr

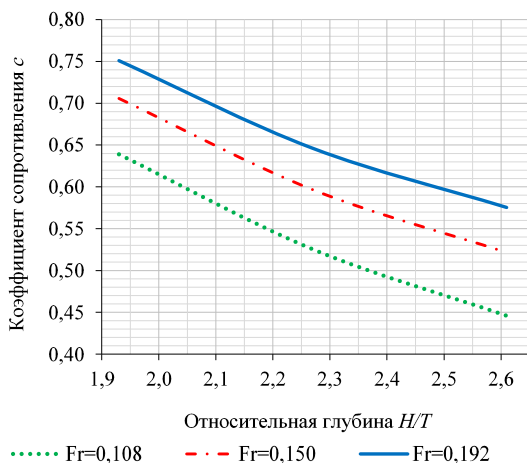


Рис. 5. Зависимость коэффициента c от относительной глубины H/T
Fig. 5. Dependence of coefficient c on relative depth of H/T

Более существенное увеличение коэффициента c происходит с уменьшением фактора H/T (рис. 5). Это увеличение в пределах рассматриваемых глубин составляет 30–43%. Здесь диапазон обусловлен разницей чисел Фруда. Интенсивность изменения коэффициента c снижается с увеличением относительной глубины.

Судя по уравнению регрессии (9), имеет место взаимодействие двух рассматриваемых определяющих факторов. При относительно небольшом снижении достоверности аппроксимации указанное взаимодействие уже не проявляется, в уравнении (10) соответствующего слагаемого нет. То есть указанное взаимодействие слабое; аналогичный вывод можно сделать и по графикам (рис. 4, рис. 5).

Выводы:

1. Опираясь на положения гидромеханики, определили перечень факторов, которые могут влиять на величину исследуемой гидродинамической нагрузки. Зависимость этой нагрузки от определяющих факторов преобразовали, представив уменьшившееся количество её составляющих в безразмерном виде. Привели аргументацию допустимости игнорирования в данном случае числа Рейнольдса как определяющего фактора и критерия подобия. В результате установили, что коэффициент гидродинамического сопротивления устройства с определёнными геометрическими пропорциями можно рассматривать как функцию числа Фруда и относительной глубины потока;

2. По результатам экспериментальных исследований на физической модели устройства получили уравнения регрессии (9), (10), позволяющие вычислять значения указанного коэффициента. С его использованием по формуле (7) определяется гидродинамическая нагрузка на устройство в процессе эксплуатации;

3. Из двух основных определяющих факторов, согласно модели (9), на коэффициент гидродинамического сопротивления в данном случае более существенно влияет относительная глубина. Увеличение упомянутого коэффициента c её уменьшением в исследованном диапазоне составляет 30–43%, разброс обусловлен разницей чисел Фруда. Интенсивность изменения коэффициента c снижается с увеличением относительной глубины;

4. При изменении числа Фруда от 0,108 до 0,192 коэффициент c увеличивается на 17–29%, разброс обусловлен различием глубин. Интенсивность этого увеличения с приближением к верхней границе исследованного диапазона Fr несколько снижается. Заметим, что число Фруда линейно зависит от скорости. Гидродинамическая нагрузка линейно зависит от исследуемого коэффициента, при этом согласно формуле (7) она ещё непосредственно зависит от квадрата скорости. То есть влияние скорости тече-

ния на гидродинамическую нагрузку наиболее значительно. Взаимодействие между определяющими факторами проявляется относительно слабо;

5. Результаты исследования предоставляют возможность обеспечения надёжного крепления рассматриваемого устройства, избежав при этом чрезмерных затрат.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Войткунский Я.И., Фадеев Ю.И., Федяевский К.К. Гидромеханика. Л.: Судостроение, 1982. 568 с.

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

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

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

Посыпанов С.В., Песков И.А. Технология навигационной сплотки двухъярусных пакетных лесотранспортных единиц // Аллея Науки: [науч.-практ. электр. журнал]. 2018. № 5-8(21). С. 73–75.

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

Харитонов В.Я., Посыпанов С.В. Опыт внедрения единого транспортного пакета вместо молевого лесосплава // ИВУЗ. Лесной журнал. 2007. № 1. С. 45–52.

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

Kleinstreuer C. Modern Fluid Dynamics. Springer Netherlands, 2010. 622 p.

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

References

Chekalkin K.A. Dvizheniye tverdykh tel v zhidkosti [Movement of solids in liquids]. L.: LTA, 1981. 48 p. (In Russ.)

Kleinstreuer C. Modern Fluid Dynamics. Springer Netherlands, 2010. 622 p.

Korpachyov V.P., Ryabokon' Yu.I. Soprotivleniye vody dvizheniyu lesotransportnykh yedinit v vodnom potoke: uchebnoye posobiye [Resistance of water to the movement of timber transport units in a water flow]. Krasnoyarsk: STI, 1978. 62 p. (In Russ.)

Pizhurin A.A. Osnovy nauchnykh issledovaniy v derevoobrabotke [Basics of scientific research in woodworking]. M.: MGUL, 2005. 305 p. (In Russ.)

Posypanov S.V., Peskov I.A. Tekhnologiya navigatsionnoy splotki dvukh'yarusnykh paketnykh lesotransportnykh yedinit [Technology of navigational joining of two-tier

packages for transport of timbers]. *Alleya Nauki*: [nauch.-prakt. elektr. zhurnal], 2018, no. 5-8(21), pp. 73–75. (In Russ.)

Rodionov P.M. Metod podobija i yego primeneniye k resheniyu zadach lesosplava [Similarity method and its application to solve timber rafting problems]. L.: LTA, 1982. 84 p. (In Russ.)

Voytkunskiy Ya.I., Fadeev Iu.I., Fedjaevskij K.K. Gidromekhanika [Hydromechanics]. L.: Sudostroyeniye, 1982. 568 p. (In Russ.)

Voytkunskiy Ya.I. Soprotivleniye dvizheniyu sudov [Resistance to ship traffic]. L.: Sudostroyeniye, 1988. 288 p. (In Russ.)

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

Haritonov V.Ya., Posypanov S.V. Opyt vnedreniya edinogo transportnogo paketa vmesto molevogo lesosplava [Experience of introducing transport package instead of drift floating]. *IVUZ. Lesnoj zhurnal*, 2007, no. 1, pp. 45–52. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 07.05.2024

Посыпанов С.В., Зарипов Ш.Г., Песков И.А. Обоснование гидродинамических нагрузок, воспринимаемых устройством для сплотки четырёхпакетных пучков в процессе его эксплуатации // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 251. С. 322–335. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.251.322-335

Доставка древесного сырья потребителям из наиболее удалённых лесных массивов, где сосредоточены его основные запасы, зачастую экономически оправдывается только при осуществлении её по водным путям. При эффективном использовании разветвлённых речных сетей обычно начальная относительно короткая часть маршрута доставки проходит по мелководным участкам. После их преодоления экономически целесообразно укрупнение лесотранспортных единиц. Рассматриваемое в статье устройство в совокупности с техникой лесозаготовителей позволяет эффективно и экологично выполнять укрупнение сплотовых единиц. С его помощью из малогабаритных пакетов без нарушения их целостности сплавляют двухъярусные четырёхпакетные пучки. Эксплуатация устройства предполагает его перестановки с места на место. Описываемое исследование направлено на получение достоверных сведений о гидродинамических усилиях, воспринимаемых устройством в процессе эксплуатации. Такие сведения позволят минимизировать затраты на крепление устройств при соблюдении условия его надёжности. Установлены факторы, которые теоретически влияют на величину указанных усилий. Зависимость между означенными усилием и факторами в результате преобразований представлена как функция коэффициента гидродинамического сопротивления от сократившегося ряда безразмерных величин. Приведена аргументация допустимости игнорирования в данном случае числа

Рейнольдса как определяющего фактора и критерия подобия. В результате доказано, что коэффициент гидродинамического сопротивления устройства с определёнными геометрическими пропорциями можно рассматривать как функцию числа Фруда и относительной глубины потока. Установлена содержащая упомянутый коэффициент аналитическая формула, предназначенная для определения исследуемой нагрузки. По результатам опытов на физической модели устройства, выполненных по полному факторному плану с обеспечением подобия, получены уравнения регрессии, позволяющие вычислять значения указанного коэффициента. Знание этой величины позволяет определять по упомянутой аналитической формуле гидродинамическую нагрузку на устройство с расположенной в нём сплоченной единицей. С помощью полученного уравнения регрессии выполнена оценка характера и степени влияния числа Фруда, относительной глубины на величину коэффициента гидродинамического сопротивления.

Ключевые слова: лесосплав, устройство для сплотки, пакеты лесоматериалов, гидродинамическая нагрузка.

Posypanov S.V., Zaripov Sh.G., Peskov I.A. Justification of hydrodynamic loads perceived by the device for forming four-packet beams during its operation. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2024, iss. 251, pp. 322–335 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.251.322-335

Delivery of wood raw materials to consumers from the most remote forest areas, where its main reserves are concentrated, is often economically justified only when carried out by waterways. When branched river networks are used effectively, the initial relatively short part of the delivery route usually passes through shallow water areas. After overcoming them, it is economically feasible to enlarge timber transport units. The device discussed in the article, together with logging equipment, allows for the enlarge of timber transport units in an efficient and environmentally friendly manner. With its help, small-sized packages without compromising their integrity are assembled into two-tier, four-packet bundles. Operating the device involves moving it from place to place. The described study is aimed at obtaining reliable information about the hydrodynamic loads acting on the device in operating condition. Their presence will ensure its reliable fastening, while avoiding excessive costs. Factors have been identified that theoretically influence the magnitude of these loads. The relationship between the hydrodynamic load and the determining factors is reduced to dimensionless form. The admissibility of excluding the Reynolds number from the number of determining factors is substantiated. Dimensionless geometric factors characterizing the shape of the underwater part of the device and the base timber transport unit are fixed. As a result of theoretical studies, an analytical formula was established by which the hydrodynamic load perceived by the device should be determined, and the dependence of the hydrodynamic resistance coefficient on the Froude number and the relative depth at the place of work was obtained, presented in symbolic form. Using this dependence, experimental studies were carried out on a physical model in compliance with similarity using a full factorial design. Based on

the results of the experiments, regression models were obtained to calculate the values of the hydrodynamic resistance coefficient in the case under consideration. Knowing this value allows one to determine, using the mentioned analytical formula, the hydrodynamic load on the device with the timber transport unit located in it. An analysis of the influence of the main determining factors on the value of the coefficient under study was carried out.

Key words: timber rafting, forming device, timber packages, hydrodynamic load.

ПОСЫПАНОВ Сергей Валентинович – профессор Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова, доктор технических наук, профессор. ResearcherID: ABF-6542-2021. 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, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. ResearcherID: ABF-6542-2021. ORCID: 0000-0003-0600-7089. SPIN-code: 8592-0690.

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

ЗАРИПОВ Шакур Гаянович – профессор Лесосибирского филиала Сибирского государственного университета науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнева, доктор технических наук, доцент. ORCID: 0000-0001-6483-2453.

662543, ул. Победы, д. 29, г. Лесосибирск, Красноярский край, Россия. E-mail: zaripov_sh@mail.ru

ZARIPOV Shacur G. – DSc (Technical), Associate Professor, Lesosibirsk Branch of Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. ORCID: 0000-0001-6483-2453

662543. Pobedy str. 29. Lesosibirsk. Krasnoyarsk Krai. Russia. E-mail: zaripov_sh@mail.ru

ПЕСКОВ Илья Александрович – аспирант Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова. ORCID: 0000-0002-7068-0326.

163002, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия. E-mail: peskovily@gmail.com

PESKOV Ilya A. – PhD Student, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. ORCID: 0000-0002-7068-0326.

163002. Severnoj Dviny emb. 17. Arkhangelsk. Russia. E-mail: peskovily@gmail.com