

УДК 630.378

МЕТОД ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ФИКТИВНОГО УВЕЛИЧЕНИЯ МАССЫ ЛЕСОТРАНСПОРТНЫХ ЕДИНИЦ ПРИ ИХ НЕРАВНОМЕРНОМ ДВИЖЕНИИ В ВОДЕ

С.В. ПОСЫПАНОВ, доц. САФУ, канд. техн. наук⁽¹⁾

s.posypanov@narfu.ru

⁽¹⁾ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова» (САФУ), 163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины, 17

В настоящее время активизировалась разработка новых конструкций лесотранспортных единиц (ЛТЕ), предназначенных для организации экологически щадящего экономичного транспорта лесоматериалов по малым и средним рекам, замещающего прекращенный молевой сплав. Для обеспечения возможности выполнения инженерных расчетов, связанных с применением этих ЛТЕ, проводятся исследования их движения в воде, в том числе неравномерного. Существующие методы исследования неравномерного движения ЛТЕ в воде имеют ряд недостатков и могут быть усовершенствованы. В статье введено понятие коэффициента фиктивного увеличения массы (КФУМ) ЛТЕ, связанного с известным коэффициентом нестационарности, с помощью которого учитываются гидродинамическое сопротивление, обусловленное инерционностью воды, нестационарная часть сопротивления и часть массы воды, заполняющей пустоты в ЛТЕ. Предложен метод экспериментального определения КФУМ, позволяющий при снижении трудоемкости обработки опытных данных обеспечить получение более точных моделей для него или для коэффициента нестационарности, возможность применения для расчета параметров движения ЛТЕ достаточно универсальных аналитических формул, наглядно отражающих физическую сущность явлений. При обосновании метода доказано, что вместо изменяющегося в процессе движения КФУМ может быть использована постоянная для данного случая величина, зависящая, кроме всего прочего, от степени завершенности процессов разгона или торможения. Этой величине присвоено название интервального КФУМ. Его значение определяется исходя из того, что при указанной замене соотношение между параметрами движения остается прежним. Для вычисления интервальных КФУМ предложены формулы, полученные в результате решения дифференциального уравнения, описывающего неравномерное движение ЛТЕ в воде. Дано краткое описание современной регистрирующей аппаратуры и программного обеспечения, позволяющих получать графики зависимости скорости движения ЛТЕ в воде от времени и соответствующие графикам таблицы. Приведен алгоритм установления необходимых данных по этим графикам. Представлены перечни определяющих безразмерных факторов, которые могут быть значимыми при получении математических моделей для интервальных КФУМ в случаях разгона и торможения.

Ключевые слова: сплав, лесотранспортная единица, неравномерное движение, метод, эксперимент, коэффициент, сопротивление воды.

Выполнение технологических и прочностных расчетов при организации лесосплавных работ, выбор или проектирование необходимых машин и механизмов предполагают потребность в сведениях о закономерностях движения в воде лесотранспортных единиц (ЛТЕ), к которым относят плоты, их секции, пучки, линейки из пучков и т. д. Актуальность вопроса возросла в связи активизацией разработок конструкций новых ЛТЕ, предназначенных для организации экологически щадящего экономичного транспорта лесоматериалов по малым и средним рекам, который должен заменить молевой сплав на них. Изучению указанных закономерностей посвящено довольно много работ, базовым источником информации для которых послужили соответствующие труды по движению судов, такие как [1, 10]. Основная часть пуб-

ликаций по ЛТЕ означенного профиля связана с исследованием равномерного движения. Изучение неравномерного не менее важно, но более проблематично. Исследователи, которые занимались им, менее многочисленны. По неравномерному движению ЛТЕ наиболее известны работы К.А. Чекалкина [2], В.Я. Харитоновой [3], А.А. Митрофанова [4], М.М. Овчинникова и П.М. Родионова [5]. Для самых ранних работ характерен весьма упрощенный подход к решаемым задачам. Наиболее основательно означенный вопрос освещен в работах, выполненных под руководством М.М. Овчинникова, и в трудах А.А. Митрофанова. Они, несомненно, внесли большой вклад в рассматриваемую область знаний, что не исключает дальнейшего совершенствования выполненных научных разработок. Отметим, что полученные под

руководством М.М. Овчинникова расчетные зависимости, являясь эмпирическими, недостаточно наглядно отражают физическую сущность явлений. Кроме того, они ориентированы на решение конкретной задачи. В рассмотренном случае [5] по требуемой скорости и по приложенному усилию можно рассчитать путь и время разгона ЛТЕ. Решение других, связанных с этим процессом задач, с помощью полученных зависимостей проблематично.

В аналитических формулах с эмпирическими коэффициентами, рекомендуемых А.А. Митрофановым [4], просматривается физическая сущность явлений. Однако метод, использованный им при определении коэффициентов нестационарности (толкование представлено ниже), связан со значительными ограничениями по сложности и соответственно по точности формул, предназначенных для вычисления этих коэффициентов. Кроме того, для этого метода характерна довольно высокая трудоемкость обработки экспериментальных данных и некоторые другие недостатки.

Учитывая изложенную информацию, наличие более совершенной регистрирующей аппаратуры, современные представления о планировании и обработке данных многофакторного эксперимента, мы сочли целесообразной попытку создания означенного в заглавии статьи метода, предоставляющего более широкие возможности.

Цель работы – создание метода экспериментального определения коэффициента фиктивного увеличения массы (КФУМ) ЛТЕ при их неравномерном движении в воде, предполагающего повышение точности вычисления указанного коэффициента, снижение трудоемкости обработки экспериментальных данных, обеспечение большей универсальности расчетных формул, которые нагляднее отражали бы физическую сущность явлений.

Метод исследования – теоретический. Полученные результаты предполагается использовать при обработке экспериментальных данных.

Предлагаемый в статье метод в большей степени перекликается с использован-

ным в работах [4, 6]. С целью более наглядной демонстрации различий между ними изложение разработки выполнено в сравнительной манере.

При математическом описании неравномерного движения ЛТЕ в воде применимо уравнение

$$M(1+n)dv/dt = -R \pm F, \quad (1)$$

где M – масса ЛТЕ,

dv/dt – ее линейное ускорение,

R – сопротивление воды равномерному движению ЛТЕ, соответствующее мгновенной скорости неравномерного движения,

F – проекция на направление движения равнодействующей сил, приложенных к ЛТЕ извне,

n – коэффициент нестационарности, с помощью которого принято учитывать гидродинамическое сопротивление, связанное с инерционностью воды, нестационарную часть сопротивления [1, 7] и часть массы воды, заполняющей пустоты в ЛТЕ [4].

Во всех формулах, получаемых в процессе и в результате решения данного уравнения, n соседствует с единицей. При этом логично введение обозначения $\phi = 1+n$. Величину ϕ мы и назвали КФУМ ЛТЕ. С учетом этого выражение (1) записали несколько иначе

$$M\phi dv/dt = -R \pm F. \quad (2)$$

Отметим, что изложенные далее положения, связанные с коэффициентом нестационарности n , относятся и к коэффициенту ϕ и наоборот.

Рассмотрим наиболее характерные варианты неравномерного движения ЛТЕ в воде, в первую очередь случай ее разгона относительно потока постоянной силой F . При обращении движения аналогичным ему можно считать торможение постоянной силой F ЛТЕ, перемещающейся под воздействием потока со скоростью, не превышающей его скорости. При этом в уравнении (1) перед F будет стоять знак плюс. Величину R можно выразить через удельное сопротивление r ,

соответствующее единичной относительной скорости v .

$$R = rv^2. \quad (3)$$

При относительно небольших скоростях, характерных для перемещения ЛТЕ, присущее им значение r в процессе движения, как правило, не изменяется [2]. Усилие F также можно выразить через r и относительную скорость равномерного движения v_F , с которой ЛТЕ будет двигаться под его воздействием.

$$F = rv_F^2. \quad (4)$$

После подстановки в уравнение (1) вместо R и F правых частей выражений (3), (4) и разделения переменных получили

$$t = \frac{M}{r} \int \frac{dv}{v_F^2 - v^2}. \quad (5)$$

В соответствии с положениями гидромеханики [7] коэффициент нестационарности n , а значит и ϕ изменяются в процессе неравномерного движения ЛТЕ. При этом ϕ можно рассматривать не только как функцию времени, но и как функцию скорости $\phi(v)$. Это относится и к сомножителю $g(v) = 1/(v_F^2 - v^2)$. Согласно одной из теорем о среднем значении [11] если функции $\phi(v)$ и $g(v)$ непрерывны на $[v_n, v_k]$ и $g(v)$ на $[v_n, v_k]$ не знакопеременна, то в интервале (v_n, v_k) существует такое число V , что справедливо равенство

$$\int_{v_n}^{v_k} \phi(v) \frac{dv}{v_F^2 - v^2} = \phi(V) \int_{v_n}^{v_k} \frac{dv}{v_F^2 - v^2}. \quad (6)$$

Указанные условия выполняются в рассматриваемых нами случаях. Значение функции ϕ при конкретной величине скорости V – определенное число Φ . Далее Φ будем называть интервальным КФУМ. Соответствующее ему значение коэффициента нестационарности обозначим N и также будем называть интервальным. С учетом (5), (6) и приведенных положений записали

$$t = \Phi \frac{M}{r} \int_{v_n}^{v_k} \frac{dv}{v_F^2 - v^2}. \quad (7)$$

После интегрирования для случая разгона от $v_n = 0$, представляющего наибольший интерес, получили выражение

$$t = \frac{\Phi M}{rv_F} \operatorname{arth} \frac{v_k}{v_F}. \quad (8)$$

Эта формула позволяет рассчитать время разгона ЛТЕ до скорости v_k под воздействием внешнего усилия F , учитываемого в ней через v_F , с которой оно связано уравнением (4). Определение M и r описано в ряде работ, например [2, 4], и здесь не рассматривается. Преобразовав формулу (8), получили выражение, которое можно использовать для определения Φ по экспериментальным данным

$$\Phi = \frac{rv_F}{M \operatorname{arth}(v_k/v_F)} t. \quad (9)$$

Формулы, получаемые в результате решения дифференциального уравнения (1) при использовании описанного приема, проще, чем в источнике [4]. Однако это не основное достоинство предлагаемого метода. В работе [4] в случае разгона плота постоянной силой в указанное дифференциальное уравнение вместо n подставляется соответствующее ему выражение, полученное по экспериментальным данным

$$n = n_1 + n_2(v/v_F), \quad (10)$$

где n_1, n_2 – параметры эмпирической формулы, определяемые одним комплексным фактором, характеризующим геометрию подводной части плота.

Для вычисления указанных параметров предложены также эмпирические формулы

$$n_1 = 0,469 \frac{B}{\sqrt[3]{BLT} \rho_{л}/\rho} - 0,369; \quad (11)$$

$$n_2 = 0,564 \frac{B}{\sqrt[3]{BLT} \rho_{л}/\rho} + 0,648, \quad (12)$$

где B, L, T – ширина, длина и осадка плота соответственно;

$\rho, \rho_{л}$ – плотности воды и лесоматериалов.

Коэффициенты корреляции для модели (11) 0,86, для (12) – 0,79 [4]. Простей-

ший расчет позволил установить, что достоверность аппроксимации R^2 здесь довольно низкая, по крайней мере для технических расчетов, особенно если учесть, что это однофакторные зависимости. В первом случае она составила 0,74, во втором – 0,68. Заметим, что успешность попыток охарактеризовать форму подводной части ЛТЕ одним пусть даже комплексным фактором, на наш взгляд, в большинстве случаев маловероятна. Полагаем, что для характеристики указанной формы целесообразно использовать как минимум две величины, например – относительную ширину B/T и относительную длину L/T .

Очевидно, что низкая точность вычислений n_1 и n_2 уже предполагает низкую точность результатов, получаемых с помощью формулы (10). В дополнение к этому на указанной точности негативно сказываются многочисленные аппроксимации, выполняемые при получении зависимости (10). Наряду с аппроксимациями, связанными с выражениями (11), (12), непосредственно с формулой (10) следует учесть и те, которые осуществляют при вычислении мгновенных значений коэффициента нестационарности n по экспериментальным данным. При этом использовали уравнение, полученное из формулы (1)

$$n = \frac{F - R}{M dv/dt} - 1. \quad (13)$$

Поскольку при опытах на осциллограмме регистрировались отметки времени и пути, то для получения, например, мгновенных значений ускорения dv/dt в данном случае нельзя было обойтись без аппроксимации экспериментальных данных и дифференцирования полученных зависимостей. Стремление на заключительном этапе разгона числителя и dv/dt в знаменателе выражения (13) к нулю предполагает дополнительное снижение точности результатов. Автор не приводит никаких статистических характеристик для эмпирической формулы (10). Однако представленные в работе [4] графики подтверждают изложенные выше суждения о низкой точности расчетов, выполняемых по указанной формуле. По представленной информации можно также сделать вывод о довольно

высокой трудоемкости обработки экспериментальных данных. Указанные недостатки характерны и для других работ, например [6], тех авторов, которые строго следовали положениям анализируемого метода.

Отметим, что подстановка в формулу (13) при вычислении n на место R аппроксимирующего выражения av^b и допущение равенства b двум приводит к противоречию с зависимостью (3), а значит и с теми формулами, которые были получены с ее учетом в результате решения дифференциального уравнения (1).

Проблемы с получением более точных моделей для n заложены в самом методе. Как уже было отмечено, даже при простейшей линейной модели с минимальным количеством определяющих факторов при подстановке ее в дифференциальное уравнение (1) его решение существенно усложняется. Полученные в результате выражения становятся более громоздкими. Даже незначительное усложнение модели для n с целью повышения ее точности ставит под сомнение возможность аналитического решения указанного дифференциального уравнения.

Получение достаточно точной модели для n , а следовательно и для Φ , в общем случае прежде всего предполагает учет значительного количества определяющих факторов. Опираясь на положения гидромеханики [7], теории размерностей и подобия [8], мы получили в символьном виде зависимость n от безразмерных факторов, которые теоретически могут быть значимыми при разгоне ЛТЕ в воде постоянной силой в неспецифичных условиях. Учитывая ограничения по объему статьи, мы приводим здесь лишь итоговое выражение

$$n = f(B/T, L/T, Fr, Sh), \quad (14)$$

где Fr – число Фруда;

Sh – число Струхала.

При особых условиях предполагается наличие и других определяющих факторов в зависимости (14). Например, при близости дна закономерно включение в перечень определяющих факторов глубины, отнесенной к осадке ЛТЕ – h/T .

В данном случае через число Фруда учитывается усилие F , под воздействием которого осуществляется разгон. Совместно с другими факторами зависимости (14) усилие F согласно выражению (4) определяет величину v_F , с которой и связано число Фруда

$$Fr = v_F / \sqrt{gT}, \quad (15)$$

где g – ускорение свободного падения.

В работе [4] на основе анализа экспериментальных данных отмечается «отсутствие строгой зависимости коэффициента n от конечной скорости разгона». Поскольку скорость v_F зависит от усилия F , то фактически утверждается, что F не влияет на n . Однако, согласно положениям гидромеханики, n зависит от ускорения [7]. Величина F несомненно влияет на интенсивность разгона ЛТЕ, следовательно и на ее ускорение. Учитывая это противоречие, мы не отрицаем процитированный факт, но считаем необходимым в каждом подобном исследовании обязательно анализировать зависимость n от соответствующего числа Фруда.

Число Струхала, приведенное в зависимости (14), определяется по формуле

$$Sh = \frac{T}{vt}. \quad (16)$$

Его можно назвать безразмерным временем, которое здесь характеризует степень завершенности процесса разгона. Отметим, что ее можно характеризовать и относительной скоростью v/v_F , которая меняется при разгоне в диапазоне $[0, 1]$. В данном случае это гораздо удобнее, что становится более очевидным, если учесть структуру формул (8), (9).

При значимости большинства отмеченных факторов, а тем более при введении дополнительных в специфических условиях практически нереально получение простой и достаточно точной модели для n , которую можно было бы подставить в дифференциальное уравнение (1) и затем получить его аналитическое решение. То есть метод, описанный в работе [4], при этом использовать невозможно, предлагаемый здесь – вполне применим.

Согласно положениям, сопутствующим выражению (6), интервальный КФУМ Φ зависит от границ рассматриваемого интервала. Они могут быть определены как абсолютными значениями скорости v , так и относительными v/v_F и v/v_{F^*} . Значение Φ от этого не изменится. В наиболее типичных случаях разгона от $v/v_F = 0$ интервал движения фактически может быть задан величиной v/v_F . С учетом зависимости (14) и приведенных положений можем записать

$$\Phi = \gamma(B/T, L/T, Fr, v/v_F). \quad (17)$$

Установление величин B/T и L/T при реализации экспериментального плана не вызывает вопросов. Определение значений Fr и v/v_F связано с использованием регистрирующей аппаратуры. В настоящее время на смену устройствам, фиксирующим отметки пути и времени движения буксируемого объекта, пришли более совершенные. В данном случае предпочтительна регистрация скорости. Для этого, в частности, может быть использован бесконтактный датчик оборотов ВС-401. Не вдаваясь в подробности, отметим, что он обеспечивает формирование импульсов с частотой, пропорциональной частоте прохождения тахометрических светоотражающих меток на вращающемся блоке, огибаемом нитью буксировочной системы. Сигналы от датчика проходят через дифференциальный усилитель ZET-410, аналого-цифровой преобразователь ZET-220 и поступают на компьютер. Запись и обработка сигналов реализуется с помощью программного обеспечения «ZETLAB». Для представления регистрируемой информации в более удобном для восприятия виде, в частности для перехода от частоты вращения указанного блока к линейной скорости буксируемого объекта, используется специально написанный в «MS Office Excel» макрос, строящий график зависимости упомянутой скорости от времени и формирующий при этом соответствующую графику таблицу. Пример такого графика уменьшенного размера представлен на рисунке.

Если полученный график представляет собой плавно изменяющуюся линию, подобную приведенной на рисунке, то предпо-

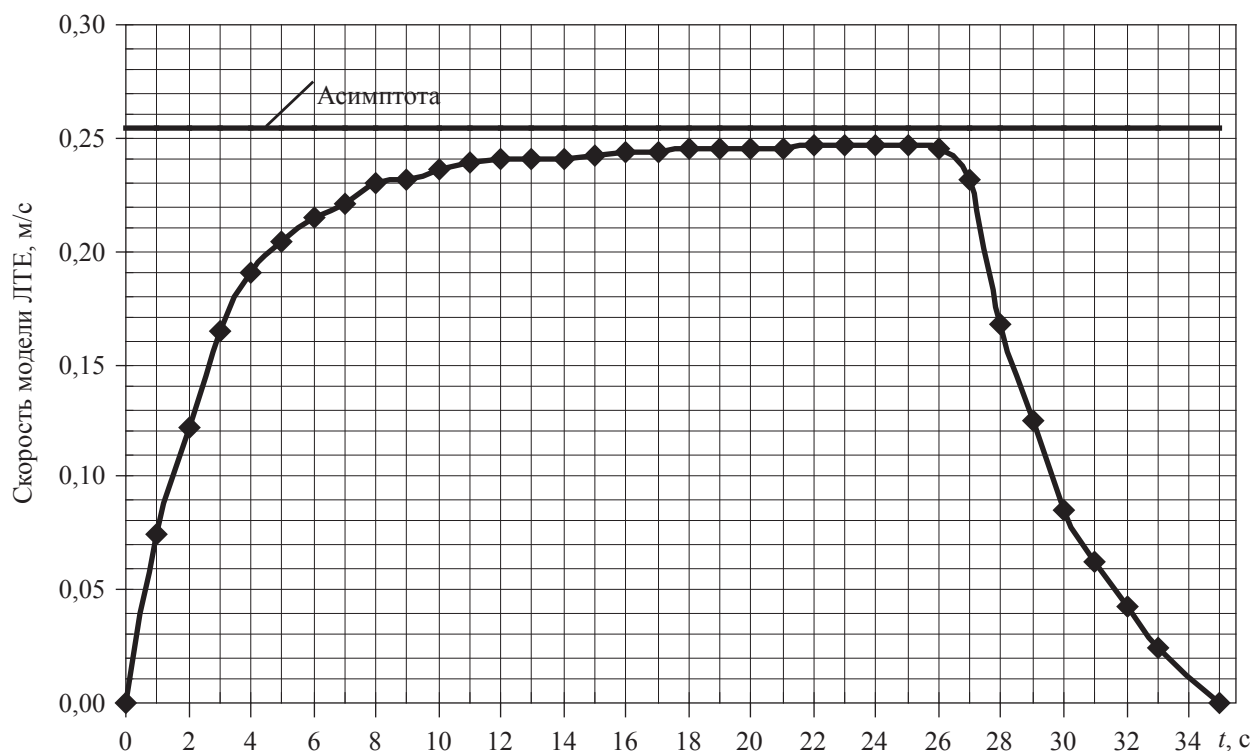


Рисунок. График зависимости скорости движения модели ЛТЕ от времени
Figure. Graph of a TRU model velocity dependence on duration

лагается установление необходимых данных непосредственно по ней. При наличии на графике некоторых скачкообразных изменений рекомендуется сглаживание кривой посредством аппроксимации, которую при однофакторной зависимости сейчас легко можно реализовать средствами самых доступных программных продуктов. При сглаживании учитывается общая тенденция, а не только ближайшие точки.

Анализируя формулу (8) отметили, что при конечной скорости разгона $v_k = v_F$ отношение $v_k/v_F = 1$, при этом $arth1$ соответственно t стремятся к бесконечности. То есть при разгоне постоянной силой F скорость ЛТЕ асимптотически приближается к скорости равномерного движения, соответствующей тяговому усилию F . Это подтверждается и экспериментально (рис. 1). Установить скорость v_F , соответствующую асимптоте, по фактическим экспериментальным данным можно, воспользовавшись выражением, приведенным в работе [4]

$$v_F = \frac{v_1 v_3 - v_2^2}{v_1 + v_3 - 2v_2}, \quad (18)$$

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

Скорость v_3 предшествует началу торможения. При сглаживании экспериментального графика аппроксимирующей зависимостью $v(t)$, предполагающей наличие горизонтальной асимптоты, скорость v_F может быть установлена как предел [11]

$$v_F = \lim_{t \rightarrow \infty} v(t). \quad (19)$$

По установленной v_F с помощью формулы (15) определяют соответствующее число Фруда. Рекомендуемый диапазон варьирования фактора v_k/v_F в выражении (17) 0,00–0,97. Шаг варьирования принимают с учетом требуемой точности результатов. Заметим, что величина шага не сказывается на количестве необходимых опытов. Полагаем, что вполне приемлем следующий набор значений v_k/v_F 0,00; 0,10; 0,20; ...; 0,90; 0,97. По величине v_F и каждому значению v_k/v_F определяют соответствующие v_k , а по ним с помощью упомянутого графика – соответствующие

ющие t . Для каждой пары v_k/v_F и t по формуле (9) вычисляют Φ . После обработки всех данных эксперимента с помощью множественного регрессионного анализа [9, 12] зависимость (17) получают в явном виде.

Другим характерным случаем неравномерного движения ЛТЕ в воде является торможение ее постоянной внешней силой при отсутствии течения. Аналог этого случая – подобное торможение при наличии течения с замедлением движения ЛТЕ относительно потока. При использовании дифференциального уравнения (2) для указанных условий перед F должен стоять знак минус. Здесь также воспользовались подстановкой вместо R и F правых частей формул (3) и (4). Разделив переменные, получили

$$t = -\frac{M}{r} \int \phi_T \frac{dv}{v_F^2 + v^2}, \quad (20)$$

где ϕ_T – КФУМ ЛТЕ при торможении ее постоянной силой.

Учитывая эту формулу и опираясь на положения аналогичные тем, что сопутствуют выражению (5), записали

$$t = -\Phi_T \frac{M}{r} \int_{v_n}^{v_k} \frac{dv}{v_F^2 + v^2}, \quad (21)$$

где Φ_T – интервальный КФУМ ЛТЕ при ее торможении постоянной силой.

Выполнив интегрирование, получили

$$t = \Phi_T \frac{M}{r v_F} \left(\arctg \frac{v_n}{v_F} - \arctg \frac{v_k}{v_F} \right). \quad (22)$$

С помощью этой формулы можно рассчитать время, за которое под воздействием внешней тормозящей силы F относительная скорость ЛТЕ уменьшится от значения v_n до v_k . Сила F здесь также учтена через скорость v_F , их связь отражена зависимостью (4). Выразив из уравнения (22) Φ_T , получили формулу, которую можно использовать для экспериментального определения этого коэффициента

$$\Phi_T = \frac{r v_F}{M (\arctg(v_n/v_F) - \arctg(v_k/v_F))} t. \quad (23)$$

Перечень факторов, которые в неспецифических условиях теоретически могут

оказывать влияние на величину Φ_T несколько шире, чем в зависимости (14). Φ_T так же как и Φ зависит от геометрических параметров B/T и L/T , от степени завершенности процесса торможения, характеризуемой отношением конечной скорости к скорости перед торможением v_k/v_n . Величина усилия F сказывается на интенсивности торможения, то есть на ускорении, следовательно, влияет на Φ_T . По аналогии с разгоняющим усилием тормозящее при приведении решения к безразмерному виду учли через число Фруда Fr_1 , определяемое по скорости равномерного движения v_F , соответствующей силе тяги F . Предполагается, что Φ_T зависит и от относительной скорости v_n , с которой начинается торможение. По ней определяется число Фруда Fr_2 , которое здесь также входит в перечень безразмерных определяющих факторов. С учетом изложенного записали

$$\Phi_T = \gamma_T(B/T, L/T, Fr_1, Fr_2, v_k/v_n). \quad (24)$$

Отметим, что в работе [4] при исследованиях торможения ЛТЕ о влиянии F , а также v_n на величину n нет никакой информации. Геометрия подводной части ЛТЕ также характеризуется только одним, хотя и комплексным безразмерным параметром, что, как было отмечено ранее, не могло не сказаться на точности результатов. Судя по графическим материалам зависимость n от v/v_F при значительном разбросе экспериментальных величин близка к квадратичной с минимумом в области средних значений v/v_F . При этом автор отмечает, что надлежащая аппроксимация экспериментальных данных предполагает усложнение модели, а это приведет к проблемам с решением дифференциального уравнения. Неявно он также признает, что используемые им зависимости от геометрических характеристик моделей плотов имеют недостаточную точность и потому упомянутая выше надлежащая аппроксимация не имеет смысла. В итоге автор предельно упрощает задачу. Для определения n при торможении плота предлагается формула, в которой учитывается только один фактор – безразмерная комплексная геометрическая характеристика ЛТЕ. Коэффициент n при этом является ве-

личиной, не изменяющейся в процессе торможения и не зависящей ни от чего, кроме указанной геометрической характеристики плота. Определяется n как средневзвешенная величина для полного торможения от начальной скорости до нулевой, а в дальнейшем используется и для частичного торможения, что, разумеется, некорректно.

Допускаем, что отдельные факторы в выражении (24) могут оказаться незначимыми в конкретном исследовании. Однако для установления этого в каждом случае требуется экспериментальная проверка.

При обработке экспериментальных данных по графику (рисунок) определяют v_n , с которой начинается торможение. Соответствующее ей Fr_2 вычисляют с помощью выражения (15). Его же используют при вычислении Fr_1 по скорости v_F , соответствующей F , которую выражают из формулы (4). Диапазон варьирования v_k/v_n здесь 0–1. Шаг этого варьирования назначают в соответствии с желаемой точностью результатов. Он может быть принят, например, 0,1. Для рассматриваемых значений v_k/v_n по установленной v_n вычисляют соответствующие v_k . По графику (рисунок) для каждого значения v_k определяют t . С помощью формулы (23) для полученных сочетаний v_k/v_n и t вычисляют значения Φ_T . После завершения описанных действий зависимость (24) представляют в виде регрессионной модели [9, 12].

Знание Φ и Φ_T , определяемых с помощью моделей, соответствующих зависимостям (17), (24), позволяет рассчитать время разгона и торможения ЛТЕ при заданных условиях с помощью формул (8), (22). В ходе дальнейшего решения дифференциального уравнения (2) получены формулы для определения других величин, связанных с неравномерным движением ЛТЕ, таких как путь, скорость, ускорение, требуемое усилие. При вычислении этих величин также используются интервальные КФУМ. В ряде расчетов предпочтительно, чтобы степень завершенности процесса разгона или торможения в модели КФУМ характеризовалась безразмерным временем или безразмерным перемещением вместо безразмерной скорости. Полу-

чение таких моделей не требует проведения дополнительных опытов. Алгоритм действий по созданию этих моделей не имеет принципиальных отличий от описанного. В связи с изложенными здесь фактами и ограниченностью объема статьи упомянутые в абзаце материалы в данной работе не приводятся.

Заключение

Описанный в статье метод экспериментального определения КФУМ ЛТЕ при их разгоне и торможении в воде позволяет при снижении трудоемкости обработки экспериментальных данных обеспечить получение более точных моделей для означенного коэффициента, возможность применения для расчета параметров движения достаточно универсальных аналитических формул, наглядно отражающих физическую сущность явлений.

Библиографический список

1. Войткунский, Я.И. Сопротивление движению судов / Я.И. Войткунский. – 2-е изд., доп. и перераб. – Л.: Судостроение, 1988. – 288 с.
2. Чекалкин, К.А. Движение твердых тел в жидкости / К.А. Чекалкин. – Л.: изд. ЛТА, 1981. – 48 с.
3. Харитонов, В.Я. Использование теории присоединенных масс в лесосплавных исследованиях и расчетах / В.Я. Харитонов // Изв. ВУЗов. Лесной журнал. – 1984. – № 5. – С. 43–48.
4. Митрофанов, А.А. Лесосплав. Новые технологии, научное и техническое обеспечение: моногр. / А.А. Митрофанов. – Архангельск: Изд-во АГТУ, 2007. – 492 с.
5. Овчинников, М.М. Сопротивление движению хлыстовых плотов / М.М. Овчинников, П.М. Родионов // Лесная промышленность. – 1979. – № 6. – С. 28–29.
6. Ватлина, Я.В. Результаты исследования сопротивления воды движению лесотранспортных единиц / Я.В. Ватлина, Г.Я. Суров // Изв. ВУЗов. Лесной журнал. – 2014. – № 2. – С. 52–60.
7. Войткунский, Я.И. Гидромеханика / Я.И. Войткунский, Ю.И. Фадеев, К.К. Федяевский. – Л.: Судостроение, 1982. – 568 с.
8. Родионов, П.М. Метод подобия и его применение к решению задач лесосплава / П.М. Родионов. – Л.: ЛТА, 1982. – 84 с.
9. Пижурич, А.А. Основы научных исследований в деревообработке: учеб. для студ. вузов / А.А. Пижурич. – М.: МГУЛ, 2005. – 305 с.
10. Larsson L., Stern F., Visonneau M. Numerical ship hydrodynamics. Springer Netherlands, 2014.
11. Whittaker E.T., Watson G.N. A Course in Modern Analysis, 4th ed. Cambridge, England: Cambridge University Press, 2009. 620 p.
12. Weisberg S. Applied Linear Regression: Third edition. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2005. 329 p.

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE IMAGINARY COEFFICIENT OF A MASS INCREMENT OF A TIMBER RAFTING UNIT DURING NON-STATIONARY MOTION IN WATER

Posypanov S.V., Assoc. Prof. NARFU, Ph. D. (Tech.)⁽¹⁾

s.posypanov@narfu.ru

⁽¹⁾ Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov (NARFU), nab. Severnoy Dviny, 17, 163002, Arkhangelsk, Russia

The Development of the new designs of the timber rafting units (TRU) for an economical and eco-friendly transportation of logs along small and medium-size rivers as an alternative for prohibited loose floating is activated nowadays. In order to provide an opportunity of practical valuations concerning the TRU the investigations of their motion in water, including non-stationary, are performed. The existing techniques of a non-stationary motion have a potential for upgrading. The paper introduces the coefficient of imaginary mass increment (CIMI) of TRU which is bound to known coefficient of non-stationarity considering hydrodynamic water resistance and a mass portion of water filling up the hollows of a TRU. A method of a CIMI experimental determination, allowing correct acquisition of its models or non-stationarity coefficient, is proposed. It is demonstrated that instead of an alternating CIMI, the constant for the given case value depending on termination of acceleration or deceleration processes can be applied. This constant is nominated as an interval CIMI. Its value is determined based on a permanent relation between the parameters of motion. The formulas for the interval CIMI computation, based on a differential equation describing non-stationary motion of a TRU in water, are put forward. A short list of the modern recording instruments and a software support providing derivation of the graphs and corresponding tables of a TRU velocity dependence on a motion duration are presented. The algorithm of the relevant necessary data for the graphs is put forward. The lists of the dimensionless factors which tend to be significant for the mathematic models of the interval CIMI in the cases of acceleration and deceleration is presented.

Keywords: timber rafting, timber transport unit, non-stationary motion, method, experiment, coefficient, water resistance.

References

1. Voytkunskiy Ya.I. *Soprotivleniye dvizheniyu sudov* [Resistance to vessels motion], L.: Sudostroyeniye, 1988, 288 p.
2. Chekalkin K.A. *Dvizheniye tverdykh tel v zhidkosti* [Motion of the solid bodies in a liquid medium], L.: LTA Publ., 1981, 48 p.
3. Kharitonov V.Ya. *Ispolovaniye teorii prisoedinennykh mass v lesosplavnykh issledovaniyakh i raschetakh* [Application of a theory of conjoint masses in the studies and computations of timber floating] Bulletin of higher education institutions. Lesnoy Zhurnal, 1984, No. 5, pp. 42-48.
4. Mitrofanov A.A. *Lesosplav. Novyye tekhnologii, nauchnoye i tekhnicheskoye obespecheniye* [Timber floating. New technologies, scientific and technical provisions], Arkhangelsk: AGTU Publ., 2007, 492 p.
5. Ovchinnikov M.M. *Soprotivleniye dvizheniyu khlystovukh plotov* [Tractive resistance of the tree-long logs rafts], Moscow, Timber Industry, 1979, No. 6, pp. 28-29.
6. Vatlina Ya.V., Surov G.Ya. *Rezultaty issledovaniya soprotivleniya vody dvizheniyu lesotransportnykh yedinit* [The results of the water resistance to the timber transport units motion]. Bulletin of higher education institutions. Lesnoy Zhurnal, 2014, No. 2, pp. 52-60.
7. Voytkunskiy Ya.I. *Gidromekhanika* [Hydromechanics], Leningrad: Sudostroyeniye, 1982, 568 p.
8. Rodionov P.M. *Metod podobiya i yego primeneniye k resheniyu zadach lesosplava* [The resemblance method and its appliance to the problems of timber floating], Leningrad: LTA, 1982, 84 p.
9. Pizhurin A.A. *Osnovy nauchnykh issledovaniy v derevoobrabotke* [Basis of scientific researches in woodworking], Moscow: MGUL, 2005, 305 p.
10. Larsson L., Stern F., Visonneau M. *Numerical ship hydrodynamics*. Springer Netherlands, 2014.
11. Whittaker E.T., Watson G.N. *A Course in Modern Analysis*, 4th ed. Cambridge, England: Cambridge University Press, 2009. 620 p.
12. Weisberg S. *Applied Linear Regression: Third edition*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2005. 329 p.