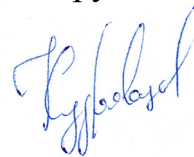


На правах рукописи



**Кудрявцев Геннадий Владимирович**

**ОБОСНОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ЖЕСТКИХ ПЛАВУЧИХ КОНТЕЙНЕРОВ ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ  
ЛЕСОМАТЕРИАЛОВ С РАЗРАБОТКОЙ ТЕХНИЧЕСКИХ  
И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ**

Специальность 05.21.01 – Технология и машины лесозаготовок  
и лесного хозяйства

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Архангельск - 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова»

Научный руководитель:

**Посыпанов Сергей Валентинович**

доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

**Войтко Петр Филиппович**

доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет», кафедра лесопромышленных и химических технологий, профессор

**Карпачев Сергей Петрович**

доктор технических наук, профессор, Мытищинский филиал ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана», кафедра промышленного транспорта и строительства, профессор

Ведущая организация:

**ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова» (г. Санкт-Петербург)**

Защита диссертации состоится 13 апреля 2021 г. в 13<sup>30</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.008.01, созданного на базе ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» по адресу: 163002, г. Архангельск, набережная Северной Двины, 17, ауд. 1220.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова»: [www.narfu.ru](http://www.narfu.ru)

Автореферат разослан «\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета, к.т.н.



Тюрикова  
Татьяна Витальевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследований.** Основная часть лесных ресурсов РФ находится на севере страны, в Сибири, на Дальнем Востоке. Территория этих регионов огромна, плотность населения очень мала. Это предопределяет низкую плотность дорожной сети. Большого увеличения этой плотности при указанных обстоятельствах и особо высокой стоимости строительства дорог в отмеченных регионах, обусловленной природными факторами, ожидать не приходится. Оно экономически нецелесообразно. В связи с этим экономическую доступность большой доли лесных ресурсов в означенных регионах зачастую можно обеспечить лишь за счет хорошо развитой речной сети. 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. А именно они обуславливают хорошую развитость речной сети. Для организации судовых перевозок лесоматериалов по указанным рекам, а точнее перевозок подобных им по назначению, могут быть использованы лесотранспортные составы, формируемые по модульному принципу из жестких плавучих контейнеров. Габариты таких составов можно менять в зависимости от конкретных путевых условий. Нужные размеры состава обеспечиваются установкой в него соответствующего количества модулей – жестких контейнеров. Это позволяет наиболее эффективно использовать небольшие габариты судового хода на малых и средних реках, а также при выходе на крупные. Применение контейнеров также позволяет осуществлять погрузку лесоматериалов в пунктах отправления техникой лесозаготовителей, то есть без плавкранов, использование которых обходится существенно дороже и зачастую невозможно.

Для реализации модульного принципа означенных перевозок, условно называемых судовыми, необходимо разработать конструкции жестких контейнеров, составов из них, а также технологические решения по их загрузке и разгрузке. Для выполнения инженерных расчетов, связанных с перемещением жестких контейнеров и составов из них, необходимы сведения о гидродинамических характеристиках этих транспортных единиц. В первую очередь предполагается определение гидродинамических характеристик жестких контейнеров.

**Степень разработанности проблемы.** Вопросы гидродинамических характеристик различных лесотранспортных единиц, технических и технологических разработок для транспортировки лесоматериалов по водным путям вызывают интерес многих ученых. Известны труды Д.Н. Афоничева, П.Ф. Войтко, Ю.Я. Дмитриева, А.Ю. Жука, А.А. Камусина, С.П. Карпачева, В.П. Корпачева, А.Ю. Мануковского, А.Н. Минаева, А.А. Митрофанова, М.М. Овчинникова, В.И. Пятякина, С.В. Посыпанова, Г.Я. Сурова, В.Я. Харитонов, В.Н. Худоногова, Е.М. Царева, К.А. Чекалкина и других авторов. Аналитический обзор ранее выполненных работ показал, что означенные выше разработки по жестким пла-

вучим контейнерам до этого не проводились. Указанные контейнеры отличаются от рассмотренных лесотранспортных единиц и судов по форме, размерам, местной конфигурации и материалу обтекаемых поверхностей, скоростному режиму, условиям эксплуатации, что предполагают существенную разницу и по гидродинамическим характеристикам. Это позволило сделать вывод о целесообразности выполнения данной работы.

**Цель работы:** обоснование гидродинамических характеристик жестких плавучих контейнеров с разработкой технических и технологических решений, расширяющих возможности транспортировки лесоматериалов по водным путям.

**Задачи исследования:**

1. Выполнить анализ вариантов доставки лесоматериалов из удаленных лесных массивов, используемых технических средств, соответствующих научных разработок с обоснованием рекомендуемых решений;

2. Выявить факторы, определяющие силу гидродинамического сопротивления равномерному движению жесткого плавучего контейнера. Обосновать рекомендуемый вариант теоретической зависимости для расчета величины означенной силы;

3. На основе экспериментальных данных разработать регрессионные модели для определения коэффициента гидродинамического сопротивления равномерному движению жесткого контейнера при отсутствии влияния дна и в условиях мелководья;

4. Обосновать предлагаемый вариант комплекта теоретических зависимостей для определения параметров движения жесткого контейнера (путь, время, скорость, ускорение) при его разгоне в воде;

5. По материалам экспериментальных исследований разработать регрессионные модели для интервальных коэффициентов фиктивного увеличения массы жесткого контейнера при его разгоне в воде внешней силой в условиях отсутствия и наличия влияния дна;

6. Разработать конструкцию жесткого плавучего контейнера с учетом использования его в качестве модуля контейнерного состава;

7. Разработать технические и технологические решения для выполнения загрузки и разгрузки жестких контейнеров, для формирования и расформирования контейнерных составов.

**Объект исследования:** жесткие плавучие контейнеры для транспортировки лесоматериалов.

**Предмет исследования:** гидродинамические характеристики жестких плавучих контейнеров для транспортировки лесоматериалов.

**Методы исследования.** В работе использованы следующие методы исследований: анализ литературы по вопросам транспорта лесоматериалов по водным путям, гидродинамических характеристик лесотранспортных единиц и судов; методы математического моделирования; теории планирования эксперимента, в частности теории подобия и размерностей, математической стати-

стики. Исследования основывались на научных положениях гидромеханики, теоретической механики.

#### **Научная новизна работы:**

- дано научное обоснование взаимодействия жесткого контейнера с водной средой, позволяющее оценить соотношение различных составляющих гидродинамического сопротивления его равномерному прямолинейному движению и принять расчетную формулу для определения общей силы означенного сопротивления;

- разработаны регрессионные модели для определения коэффициента общего гидродинамического сопротивления равномерному движению жесткого контейнера с учетом и без учета влияния мелководья;

- разработаны регрессионные модели для вычисления интервальных коэффициентов фиктивного увеличения массы жесткого контейнера в условиях наличия и отсутствия влияния дна, обеспечивающие возможность расчета параметров движения контейнера (времени, пути, скорости, ускорения) при его разгоне внешней силой;

- выполнен анализ характера и степени влияния определяющих факторов на означенные коэффициенты при равномерном движении жесткого плавучего контейнера и при его разгоне внешней силой;

- разработаны защищенные патентами конструкции жесткого плавучего контейнера и контейнерных составов для транспортировки лесоматериалов по малым и средним рекам;

- разработаны защищенные патентами технические и технологические решения для выполнения загрузки и разгрузки жестких плавучих контейнеров, для формирования и расформирования контейнерных составов, а также для применения контейнеров при очистке малых и средних рек от ранее затонувших лесоматериалов.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы.**

Выполненное научное обоснование взаимодействия жесткого контейнера с водной средой, позволяющее оценить соотношение различных составляющих гидродинамического сопротивления, полученные для случаев равномерного и неравномерного движения контейнера регрессионные модели, а также результаты анализа характера и степени влияния факторов на выходные величины моделей являются значимым вкладом в соответствующую область знаний.

Практическая значимость диссертации заключается в возможности применения разработанных технических и технологических решений для организации перевозок лесоматериалов по водным путям в жестких плавучих контейнерах, выполнения инженерных расчетов, связанных с равномерным движением и разгоном жестких контейнеров в воде при переместительных технологических операциях.

**Основные научные положения и результаты исследований, выносимые на защиту:**

1. Результаты исследований по определению гидродинамического сопро-

тивления равномерному движению жестких плавучих контейнеров.

2. Результаты исследований по разгону жестких плавучих контейнеров в воде внешней постоянной силой.

3. Результаты исследований влияния дна водоема на гидродинамические характеристики жестких плавучих контейнеров при их равномерном движении и разгоне внешней постоянной силой.

4. Технические и технологические разработки для организации перевозок лесоматериалов по водным путям в жестких плавучих контейнерах.

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности.** Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 05.21.01 – Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства по пункту 4 – «Исследование условий функционирования машин и оборудования, агрегатов, рабочих органов, средств управления» и пункту 15 – «Обоснование схем транспортного освоения лесосырьевых баз, поставки лесопроductии, выбора техники и способов строительства лесовозных дорог и инженерных сооружений».

**Достоверность полученных результатов** обеспечена методологией выполнения исследования, применением методов планирования эксперимента, теории подобия и размерностей, математической статистики, а также публикацией материалов в рецензируемых журналах, их апробацией на конференциях.

**Реализация результатов исследования.**

Результаты диссертационной работы использованы Ассоциацией «Лесопромышленный инновационный территориальный кластер Архангельской области «ПоморИнновалес» при разработке технико-экономического обоснования «Транспортно-логистическая схема доставки лесоматериалов из отдаленных труднодоступных территорий кластера «ПоморИнновалес», выполненного по заказу Автономной некоммерческой организации Архангельской области «Агентство регионального развития».

**Апробация результатов работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались на Всероссийской (национальной) научно-практической конференции Высшей инженерной школы САФУ «Инженерные задачи: проблемы и пути решения» (Архангельск, 2019); Научной конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова «Развитие северо-арктического региона: проблемы и решения» (Архангельск, 2016); Всероссийской научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные исследования в России: проблемы и перспективы развития» (Ростов-на-Дону, 2015); Международных научно-практических конференциях «Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика» (Воронеж, 2014-2015).

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 12 научных статей, в том числе 2 в изданиях из перечня ВАК, получено 9 патентов на полезные модели и изобретения.

**Личный вклад автора.** С помощью научного руководителя сформулированы цель и задачи, программа и методика исследования. Автором выполнены анализ состояния вопросы, теоретические и экспериментальные исследования, подготовлены выводы. Технические и технологические разработки, описанные в четвертом разделе, созданы совместно с коллегами при наиболее активном участии автора. При осуществлении научных мероприятий и написании совместных публикаций личный вклад автора составил около 80%.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех разделов, основных выводов и рекомендаций, списка литературы и приложений. Общий объем работы составляет 146 страниц, включая приложения – 13 страниц. Работа содержит 30 рисунков и 8 таблиц. Список литературы состоит из 92 источников.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** представлена общая характеристика диссертации, аргументирована актуальность темы, сформулирована цель работы, указаны объект и предмет исследований, отражены их научная новизна, научная и практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту.

**В первом разделе** проанализированы проблемы лесотранспортного освоения удаленных лесных массивов основных лесных регионов России. Помимо удаленности для них характерны огромные территории, очень низкая плотность населения, большие затраты на строительство дорог, наличие развитой речной сети. В означенных массивах в настоящее время находится большая часть лесных ресурсов, экономическую доступность которых с учетом указанных обстоятельств зачастую можно обеспечить лишь при лесотранспортном использовании средних и малых рек.

Судовые перевозки лесоматериалов по затратам в среднем по стране в 3,6 раза предпочтительнее автомобильных и в 2,3 раза – железнодорожных. Они позволяют доставлять по речной сети различные лесоматериалы, в том числе с дефицитом плавучести, сыпучие грузы и т.д. Однако существующие варианты доставки лесоматериалов в судах неприменимы на малых и очень ограничено применимы на средних реках. Это обусловлено габаритами барж, невозможностью или экономической нецелесообразностью использования на погрузке плавкранов.

В разделе проанализированы особенности судовых перевозок в условиях средних и малых рек, обоснованы преимущества альтернативных перевозок в контейнерных составах, формируемых по модульному принципу, позволяющему наиболее эффективно использовать габариты судового хода на конкретных маршрутах в данный период времени. При этом длина и ширина состава определяется количеством жестких плавучих контейнеров (модулей), установленных в него. Загрузка контейнеров может выполняться без плавкранов техникой лесозаготовителей.

В разделе также выполнен обзорный анализ работ по гидродинамическим характеристикам лесотранспортных единиц и судов, по итогам которого сделан вывод о необходимости соответствующих дополнительных исследований применительно к жестким плавучим контейнерам. Сформулированы задачи исследования.

**Во втором разделе** приведено теоретическое обоснование взаимодействия жесткого контейнера с водной средой при его равномерном движении и разгоне внешней силой. Установлены факторы, теоретически оказывающие влияние на величину гидродинамического сопротивления равномерному движению контейнера. Дана оценка различных составляющих гидродинамического сопротивления (трения, формы, волнового) равномерному прямолинейному движению жесткого контейнера, по результатам которой для определения указанного сопротивления рекомендована одночленной формула.

$$R = c \frac{\rho}{2} \Omega v^2, \quad (1)$$

где  $v$  – скорость движения лесотранспортной единицы относительно воды, м/с;  $\rho$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $\Omega$  – площадь миделевого сечения, м<sup>2</sup>;  $S$  – площадь трения, м<sup>2</sup>;  $c$  – коэффициент общего гидродинамического сопротивления.

Зависимость означенного сопротивления от определяющих факторов имеет вид

$$R = f\left(\rho; \mu; v; g; B_k, \frac{T_k}{B_k}, \frac{L_k}{B_k}\right), \quad (2)$$

где  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости жидкости, Па·с;  $v$  – скорость движения относительно воды, м/с;  $g$  – характеристика поля гравитационных сил, м/с<sup>2</sup>;  $B_k$ ,  $L_k$ ,  $T_k$  – соответственно размеры и осадка контейнера, м.

Зависимость (2) с помощью положений теории размерностей и подобия приведена к безразмерному виду. Обосновано исключение из ряда определяющих факторов заведомо незначимых. В результате символьное решение по коэффициенту общего гидродинамического сопротивления при отсутствии влияния дна представлено в виде

$$c = \gamma\left(Fr; \frac{T_k}{B_k}; \frac{L_k}{B_k}\right), \quad (3)$$

где  $Fr$  – число Фруда.

$$Fr = v / \sqrt{g B_k}, \quad (4)$$

Приведено теоретическое толкование особенностей равномерного движения жесткого контейнера в условиях мелководья. Обоснован набор факторов, влияющих на гидродинамическое сопротивление этому движению в указанных условиях. Выполнены преобразования с исходной символьной зависимостью, аналогичные описанным выше, в результате которых итоговое символьное решение по коэффициенту общего гидродинамического сопротивления равномерному движению жесткого контейнера на мелководье представлено в виде

$$c_{мел} = f\left(\frac{T_{\kappa}}{B_{\kappa}}; \frac{L_{\kappa}}{B_{\kappa}}; \frac{h}{B_{\kappa}}; Fr\right), \quad (5)$$

где  $h$  – глубина потока, м.

В разделе приведено теоретическое исследование разгона жесткого плавающего контейнера внешней силой. В соответствии со вторым законом Ньютона и положениями гидромеханики для рассматриваемого случая записано уравнение

$$M \frac{dv}{dt} = -R \pm R_H - R_{II} + F, \quad (6)$$

где  $M$  – масса жесткого контейнера, кг;  $dv/dt$  – ускорение, с которым движется контейнер, м/с<sup>2</sup>;  $R$  – сопротивление воды при равномерном перемещении контейнера, соответствующее скорости неравномерного движения в текущий момент времени, Н;  $R_H$  – дополнительное сопротивление воды, обусловленное нестационарностью процесса, Н;  $R_{II}$  – гидродинамическое сопротивление, обусловленное инерционностью воды, Н;  $F$  – проекция на направление движения внешней постоянной силы, приложенной к жесткому контейнеру, Н.

Приведены формулы для определения основных параметров движения контейнера при его разгоне (время, скорость, ускорение, путь), полученные в результате решения дифференциального уравнения.

$$t = \frac{\Phi M}{r v_F} \operatorname{arth} \frac{v_{\kappa}}{v_F}, \quad (7)$$

$$v_{\kappa} = v_F \operatorname{th} \frac{r v_F}{\Phi M} t, \quad (8)$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{r v_F^2}{\Phi M} \operatorname{ch}^2 \left( \frac{r v_F}{\Phi M} t \right), \quad (9)$$

$$S = \frac{\Phi M}{r} \ln \operatorname{ch} \left( \frac{r v_F}{\Phi M} t \right), \quad (10)$$

где  $t$  – время, с;  $S$  – путь, м;  $\Phi$  – интервальный коэффициент фиктивного увеличения массы;  $r$  – удельное сопротивление, кг/м;  $v_{\kappa}$  – конечная скорость контейнера относительно воды на рассматриваемом отрезке разгона, м/с;  $v_F$  – скорость равномерного движения контейнера, соответствующая разгоняющей силе, м/с.

Выявлены факторы, влияющие на величину интервального коэффициента фиктивного увеличения массы  $\Phi$  жесткого контейнера при его разгоне. Зависимость этого коэффициента от указанных факторов записана в символьном виде. С помощью теории размерностей и подобия зависимость приведена к безразмерному виду. В результате всех преобразований записано выражение

$$\Phi = \gamma_1 \left( Fr_F; \frac{v_{\kappa}}{v_F}; \frac{T_{\kappa}}{B_{\kappa}}; \frac{L_{\kappa}}{B_{\kappa}} \right), \quad (11)$$

где  $Fr_F$  – число Фруда, соответствующее скорости равномерного движения жесткого контейнера под воздействием внешнего усилия  $F$ .

При мелководе к перечню определяющих факторов в зависимости (11) добавляется относительная глубина  $h/B_K$ .

$$\Phi_{\text{мел}} = \gamma_2 \left( Fr_F; \frac{v_K}{v_F}; \frac{T_K}{B_K}; \frac{L_K}{B_K}; \frac{h}{B_K} \right). \quad (12)$$

Приведение полученных символьных зависимостей (3), (5), (11), (12) к явному виду потребовало проведения экспериментальных исследований.

**В третьем разделе** приведено описание экспериментальных исследований. Представлена информация по планированию экспериментов, их проведению, использованному оборудованию, определению значений выходных величин, первичной статистической обработке данных и регрессионному анализу.

Экспериментальные исследования проведены на моделях, выполненных в масштабе 1:20, в опытовом бассейне гравитационного типа (рис. 1, 2, 3). Безразмерные величины в скобках зависимостей (3), (5), (11), (12) – критерии подобия, они же варьируемые факторы.

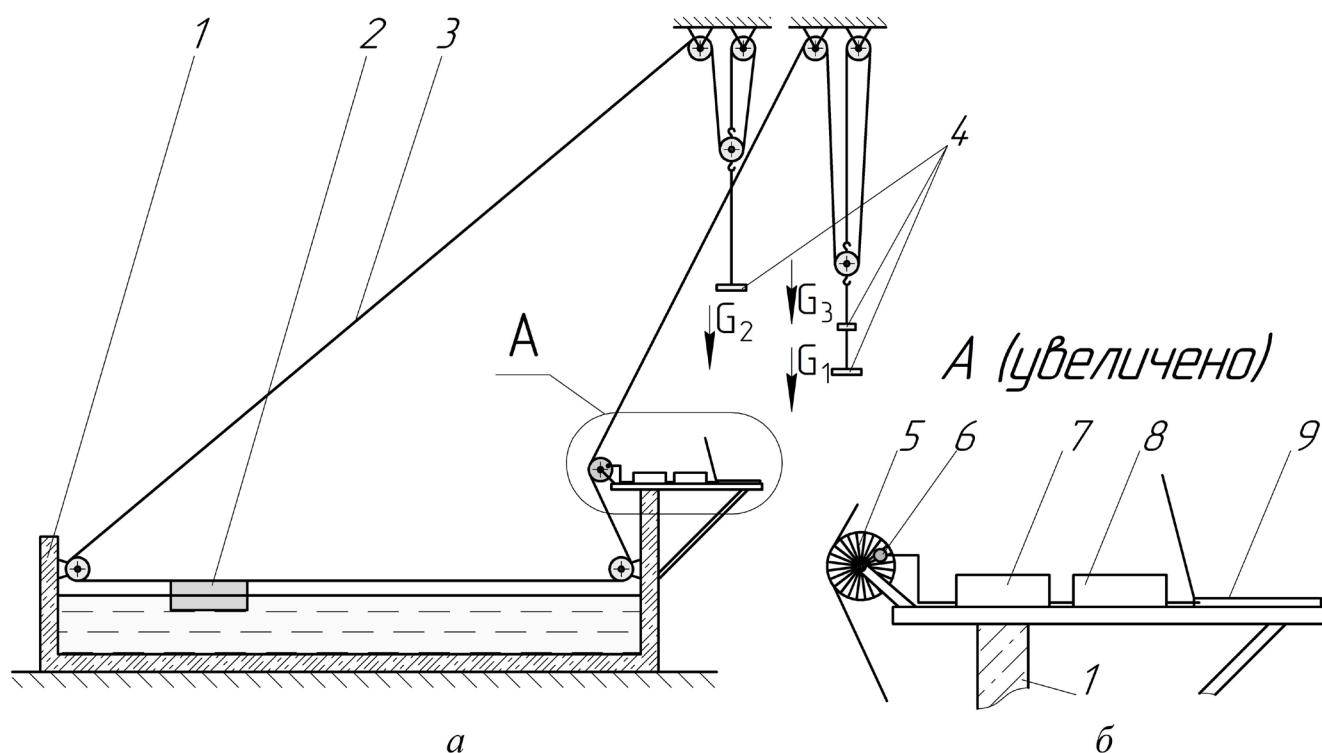


Рис. 1. Схема лабораторной установки: а – опытовый бассейн с буксировочной системой; б – элементы системы регистрации; 1 – опытовый бассейн; 2 – модель жесткого контейнера; 3 – нитеблочная система; 4 – чаши с грузами; 5 – блок с светоотражающими метками; 6 – бесконтактный датчик оборотов ВС-401; 7 – дифференциальный усилитель ZET-410; 8 – аналого-цифровой преобразователь ZET-220; 9 – ноутбук

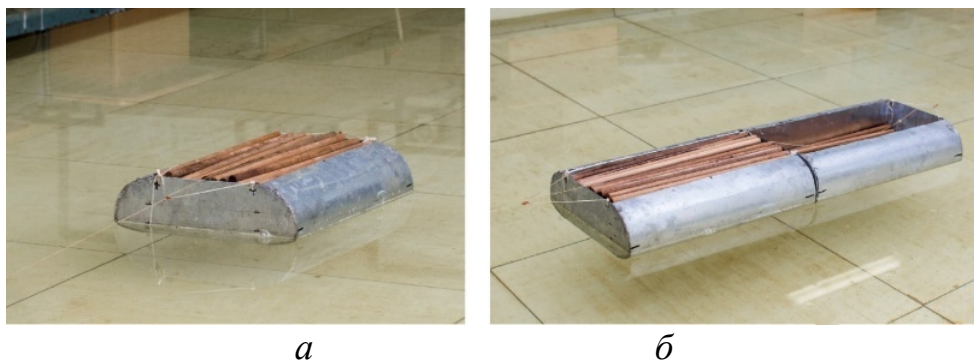


Рис. 2. Модели жесткого плавучего контейнера:  
а – модель минимальной длины; б – модель максимальной длины

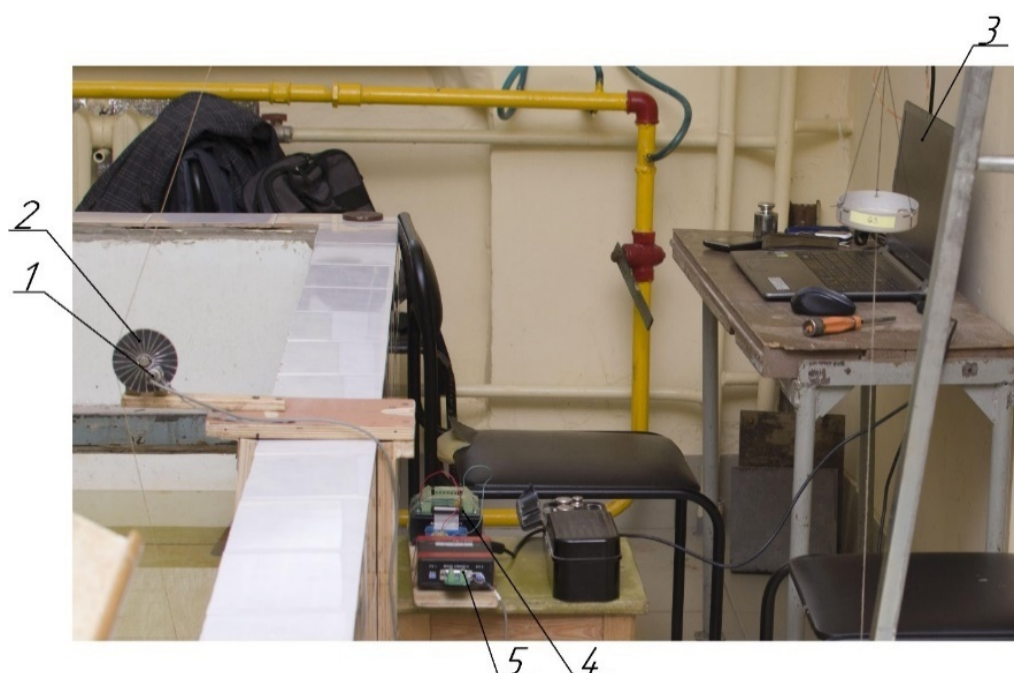


Рис. 3. Рабочее место и регистрирующая аппаратура: 1 – бесконтактный датчик оборотов ВС-401; 2 – блок со светоотражающими метками; 3 – ноутбук; 4 – аналого-цифровой преобразователь ZET-220; 5 – дифференциальный усилитель ZET- 410

Диапазоны варьирования безразмерных определяющих факторов устанавливались исходя из наиболее вероятных значений соответствующих размерных величин. При этом опирались на базовые размеры контейнера шириной 4,8 м, длиной 7,0...14,0 м, Изменение осадки предполагалось в диапазоне 0,44...1,34 м, традиционного показателя относительной глубины  $h/T_k - 1,2...4,8$ , соответственно используемого нами  $T_k/B_k - 0,098...0,282$ , скорости – 0,9...1,7 м/с, относительной скорости  $v_k/v_F - 0,25...0,90$ . Скоростной диапазон в данном случае является переходно-промежуточным между соответствующими диапа-

зонами лесотранспортных единиц и тихоходных судов. Опыты выполнены на основе полных факторных планов второго порядка.

Результаты первичной статистической обработки полученных экспериментальных данных позволили сделать вывод о допустимости применения в данном случае регрессионного анализа. Осуществили его с применением программы «Statistica».

Приведены полученные уравнения регрессии для коэффициентов общего гидродинамического сопротивления равномерному движению жестких плавучих контейнеров в условиях отсутствия влияния дна (13) и при его наличии (14), а также для интервальных коэффициентов фиктивного увеличения массы контейнеров при их разгоне при отсутствии (15) и наличии влияния дна (16).

$$c = 0,748 - 4,605Fr + 1,6\frac{T_{\kappa}}{B_{\kappa}} - 1,863Fr\frac{L_{\kappa}}{B_{\kappa}}\frac{T_{\kappa}}{B_{\kappa}} + 11,776Fr\frac{T_{\kappa}}{B_{\kappa}} + 9,133Fr^2 + 0,0255\left(\frac{L_{\kappa}}{B_{\kappa}}\right)^2 - 3,989\left(\frac{T_{\kappa}}{B_{\kappa}}\right)^2 \quad (13)$$

С учетом влияния мелководья

$$c_{\text{мел}} = 0,872 - 4,956Fr - 0,319\frac{h}{B_{\kappa}} + 0,897\frac{T_{\kappa}}{B_{\kappa}} - 0,357\frac{L_{\kappa}}{B_{\kappa}}\frac{T_{\kappa}}{B_{\kappa}} - 0,363Fr\frac{L_{\kappa}}{B_{\kappa}} + 2,213Fr\frac{h}{B_{\kappa}} - 11,025Fr\frac{h}{B_{\kappa}}\frac{T_{\kappa}}{B_{\kappa}} + 13,621Fr\frac{T_{\kappa}}{B_{\kappa}} + 9,506Fr^2 + 0,0411\left(\frac{L_{\kappa}}{B_{\kappa}}\right)^2 + 0,216\left(\frac{h}{B_{\kappa}}\right)^2 \quad (14)$$

Значение коэффициентов детерминации  $R^2$  для (13), (14) 0,88 и 0,91.

$$\Phi = 0,782 + 46,652Fr - 51,131Fr\frac{v_k}{v_F} + 13,460Fr\frac{v_k}{v_F}\frac{L_{\kappa}}{B_{\kappa}} - 2,128\frac{v_k}{v_F}\frac{L_{\kappa}}{B_{\kappa}} - 12,515Fr\frac{L_{\kappa}}{B_{\kappa}} + 6,069\left(\frac{v_k}{v_F}\right)^2 + 0,276\left(\frac{L_{\kappa}}{B_{\kappa}}\right)^2 \quad (15)$$

С учетом влияния мелководья.

$$\Phi_{\text{мел}} = 2,303 - 4,362\frac{v_k}{v_F} + 32,1Fr - 17,603Fr\frac{v_k}{v_F} + 4,869Fr\frac{v_k}{v_F}\frac{L_{\kappa}}{B_{\kappa}}\frac{h}{B_{\kappa}} - 14,863Fr\frac{v_k}{v_F}\frac{h}{B_{\kappa}} - 6,324Fr\frac{L_{\kappa}}{B_{\kappa}} + 5,563\left(\frac{v_k}{v_F}\right)^2 \quad (16)$$

Значение коэффициентов детерминации для (15), (16)  $R^2 = 0,80$  и  $0,77$ .

Модели (13)-(16) позволяют с помощью формул (1), (7)-(10), вычислять гидродинамическое сопротивление равномерному перемещению контейнера и параметры его движения при разгоне внешней силой как при отсутствии, так и при наличии влияния дна. В разделе приведен детальный анализ характера и степени влияния определяющих факторов на выходные величины указанных

моделей, которое наглядно демонстрируют графики, часть которых представлена на рис. 4.

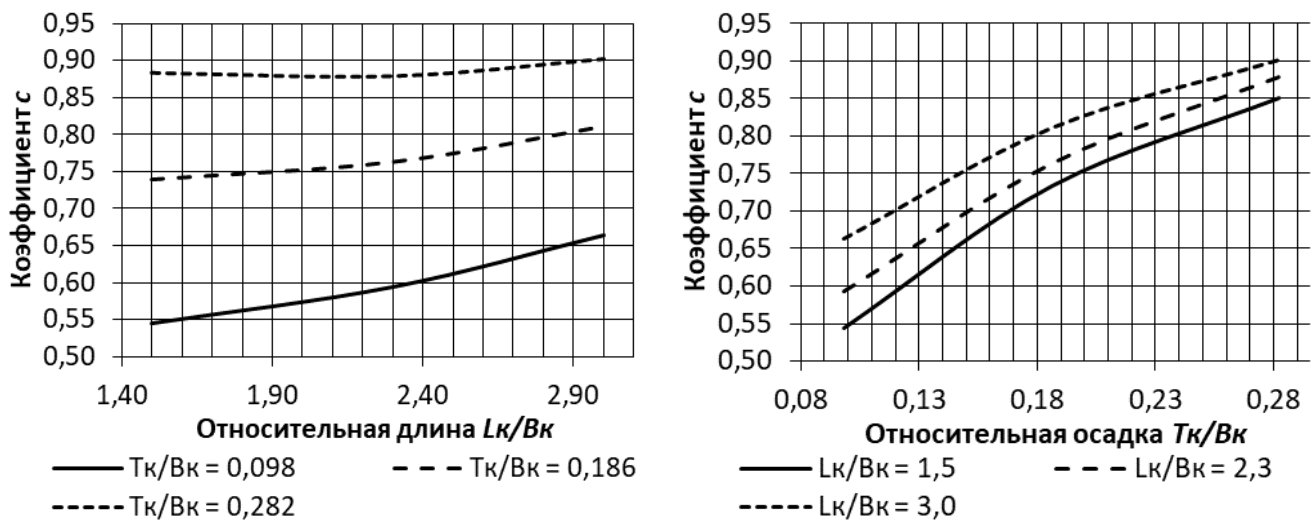


Рис. 4. Графики зависимостей коэффициента  $c$  от относительной длины и от относительной осадки контейнера при числе  $Fr = 0,195$ .

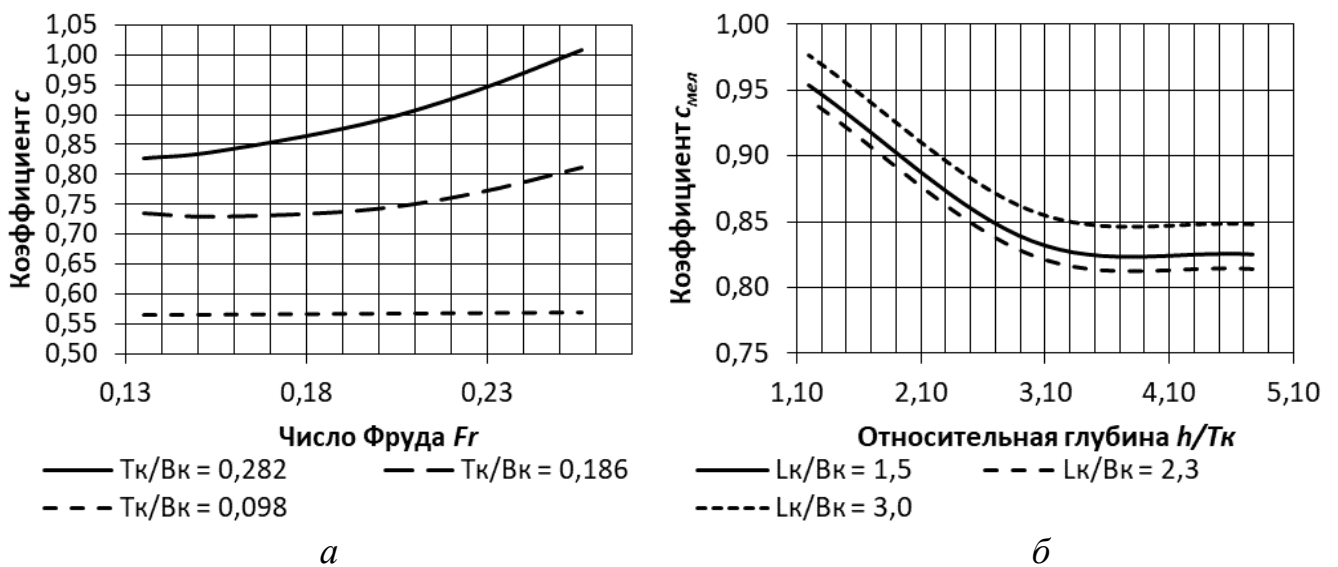


Рис. 5. Графики зависимостей коэффициента гидродинамического сопротивления: а - от числа  $Fr$  при относительной длине  $L_k/B_k=1,5$ ; б - от относительной глубины  $h/T_k$  при  $T_k/B_k=0,282$ ,  $Fr = 0,190$

В четвертом разделе приведена информация по техническим и технологическим решениям, в том числе защищенным патентами, разработанным для реализации перевозок лесоматериалов в жестких плавучих контейнерах. В частности представлены сведения о конструкции жесткого плавучего контейнера (рис. 6), ориентированной на эффективное использование его в качестве модуля контейнерных составов.

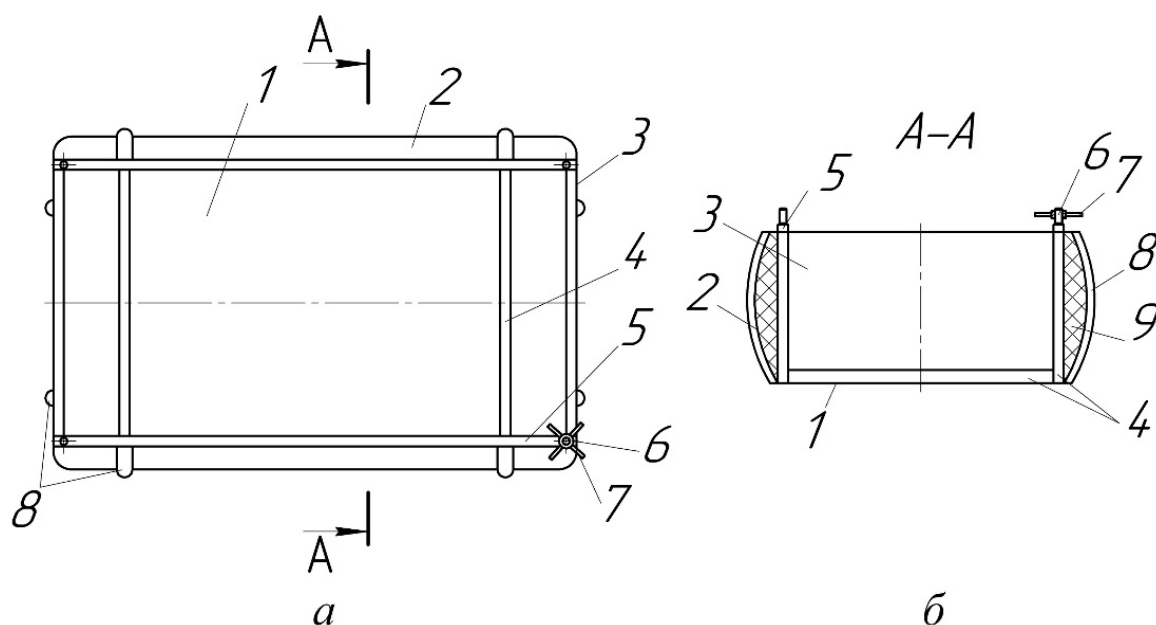


Рис. 6. Жесткий плавучий контейнер: *а* – вид сверху; *б* – поперечный разрез;  
1 – днище; 2 – боковые стенки; 3 – торцовые стенки; 4 – поперечные балки;  
5 – продольные балки; 6 – стержни с резьбой; 7 – маховик;  
8 – отбойные устройства; 9 – наполнитель

Дано описание конструкции контейнерного состава (рис. 7), позволяющей быстро выполнять его формирование и расформирование с обеспечением габаритов, соответствующих конкретным путевым условиям. Контейнеры соединяют в состав продольными и поперечными связями (вид А).

Предложены технологические схемы погрузки лесоматериалов в контейнеры и формирования из них линеек и контейнерных составов с использованием техники лесозаготовителей, с минимальным количеством быстро устанавливаемых наплавных сооружений. Схема, приведенная на рис. 8, является базовой для малых и средних рек при короткой навигации. Перемещение контейнеров здесь осуществляется с относительно большой скоростью при помощи катера, исключается тяжелый физический труд. Эффективность применения небольшого катера на подобных технологических операциях доказывает зарубежный опыт, например, в Финляндии, на рейде Сайма. Перемещение катером сразу двух контейнеров с энергетической точки зрения намного предпочтительнее, что доказано в ходе исследований. Однако при этом усложняется маневрирование катера.

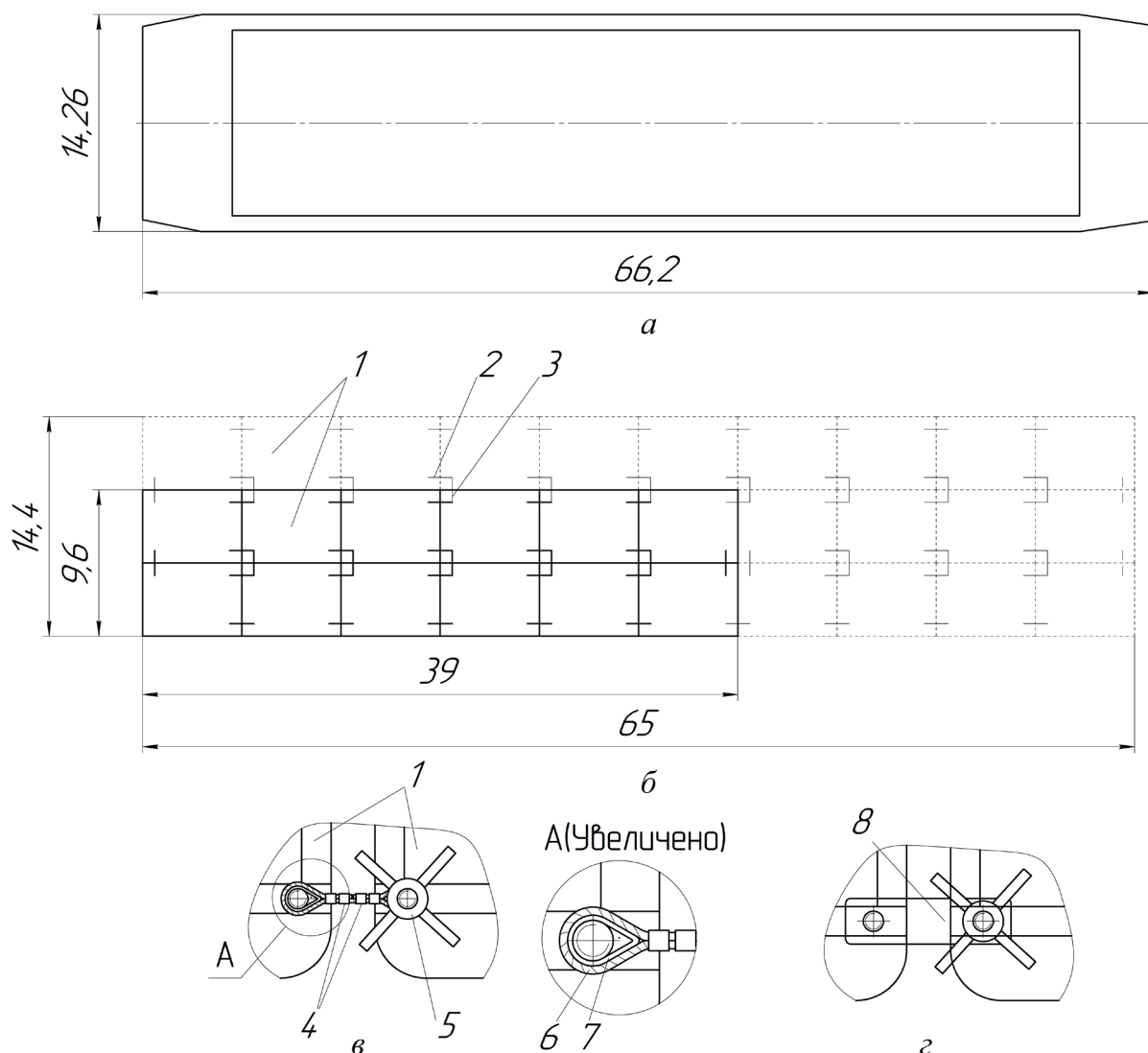


Рис. 7. Баржа-площадка проекта 942 и баржевой состав из жестких контейнеров (баржевых модулей): а – баржа-площадка; б – баржевой состав; в – узел соединения контейнеров стальными канатами; г – узел соединения контейнеров стальными пластинами: 1 – жесткий контейнер; 2 – продольные связи; 3 – поперечные связи; 4 – гильзовые зажимы, 5 – маховик; 6 – стальной канат; 7 – коуш; 8 – стальная пластина

Помимо базовой предложена технологическая схема, не требующая наличия катера во время формирования баржевого состава (рис. 9).

Также в разделе представлена схема погрузки лесоматериалов в жесткие плавучие контейнеры с использованием мобильного причала. По аналогичным схемам возможна выгрузка лесоматериалов у потребителей. При этом нужно изменить в основном последовательность действий. Выгрузка по схеме, приведенной на рис. 10, не требует подведения под разгрузку по отдельности каждой линейки.

В разделе описана технология применения жестких плавучих контейнеров при очистке малых и средних рек от ранее затонувших лесоматериалов.

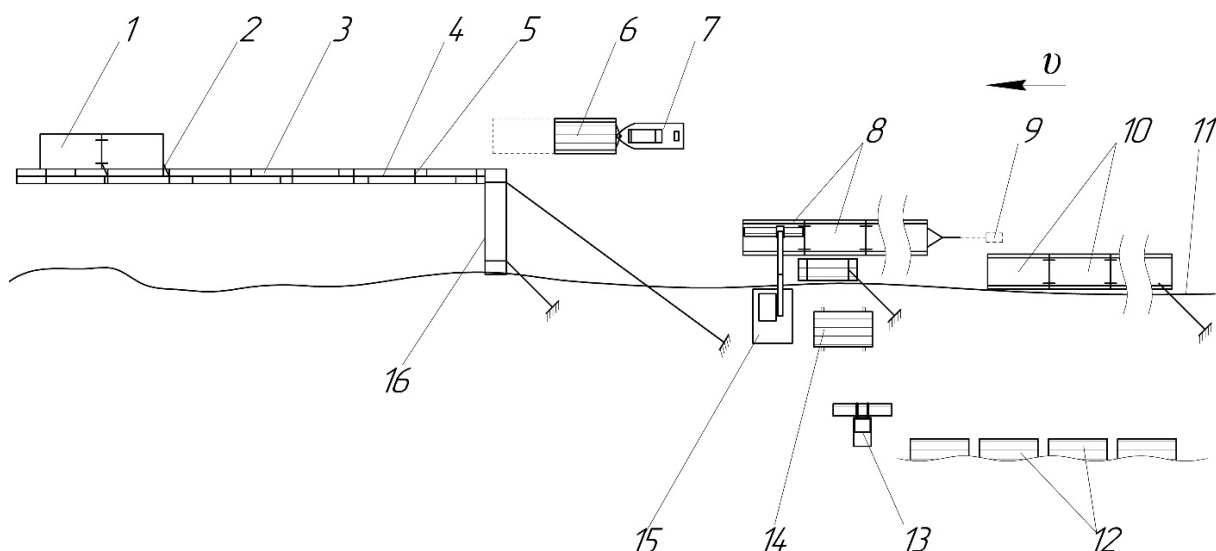


Рис. 8. Схема формирования контейнерного состава с помощью катера:  
 1 – контейнер, установленный в состав; 2 – крепление контейнера к шлагу стального каната; 3 – бон двухбрусенный; 4 – стальной канат; 5 – шлаг стального каната; 6 – контейнер, транспортируемый к месту установки;  
 7 – катер; 8 – загружаемый контейнер; 9 – лот; 10 – линейка пустых контейнеров напередержке; 11 – урез воды; 12 – штабеля лесоматериалов; 13 – челюстной погрузчик; 14 – пачка лесоматериалов; 15 – погрузчик с манипулятором; 16 – поперечный бон

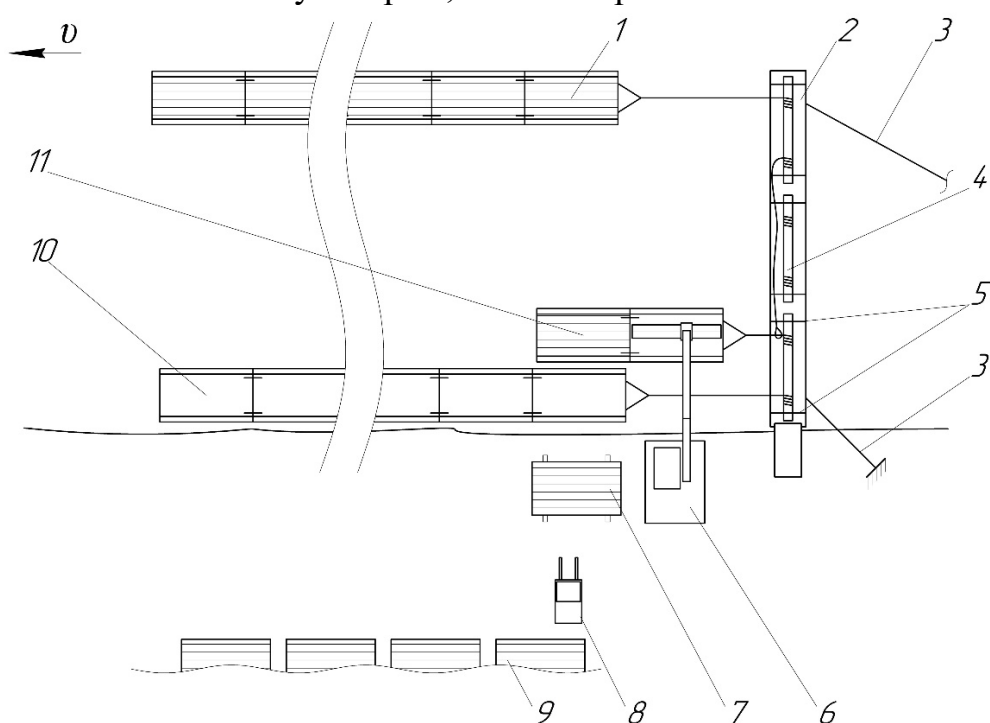


Рис. 9. Схема погрузки лесоматериалов в контейнеры и формирования состава из них за консольной наплавной опорой: 1 – сформированная линейка; 2 – хлыстовый пучок; 3 – крепление хлыстового пучка; 4 – анкер; 5 – борткомплекты; 6 – погрузчик; 7 – пачка лесоматериалов; 8 – вспомогательный погрузчик; 9 – штабеля лесоматериалов; 10 – линейка пустых контейнеров; 11 – формируемая линейка на погрузке

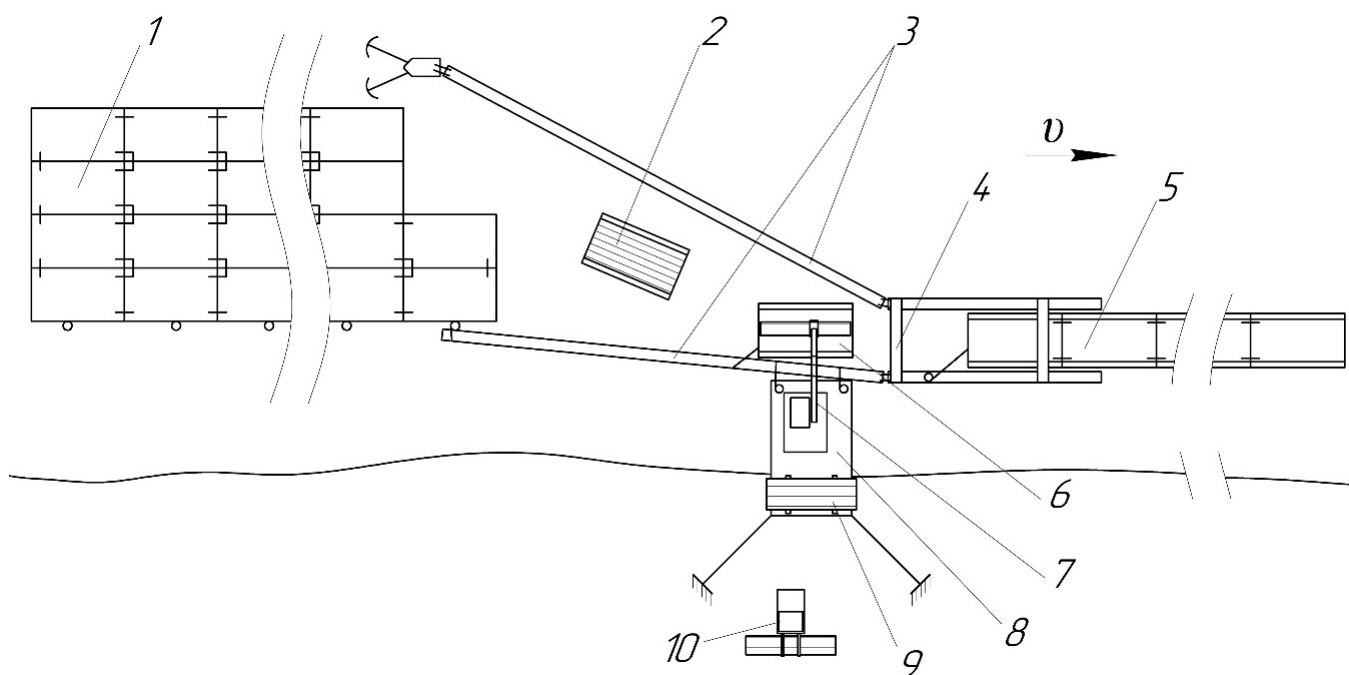


Рис. 10. Схема расформирования контейнерного состава и выгрузки лесоматериалов из контейнеров: 1 – контейнерный состав; 2 – контейнер; 3 – направляющие боны; 4 – коридор; 5 – линейка пустых контейнеров; 6 – контейнер на разгрузке; 7 – погрузчик с манипулятором; 8 – мобильный причал; 9 – пачка круглых лесоматериалов; 10 – челюстной погрузчик

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ И РЕКОМЕНДАЦИИ

**Выводы.** 1. Обосновали целесообразность доставки круглых лесоматериалов из удаленных лесных массивов по средним и малым рекам в контейнерных составах, формируемых из жестких плавучих контейнеров по модульному принципу, позволяющему наиболее эффективно использовать небольшие габариты судового хода на указанных реках и применять при погрузке лесоматериалов технику лесозаготовителей в совокупности с простыми устройствами.

2. Установили факторы, влияющие на силу гидродинамического сопротивления равномерному движению жесткого плавучего контейнера, и обосновали рекомендуемый вариант теоретической зависимости для вычисления величины этой силы.

3. По результатам проведенных экспериментов разработали регрессионные модели для определения входящего в указанную теоретическую зависимость коэффициента гидродинамического сопротивления равномерному движению жесткого контейнера при существенных глубинах и на мелководье.

4. Обосновали рекомендуемый вариант комплекта теоретических зависимостей для определения параметров движения жесткого контейнера (путь, время, скорость, ускорение) при его разгоне в воде.

5. По материалам выполненных экспериментальных исследований разработали регрессионные модели для вычисления входящих в рекомендованные теоретические зависимости интервальных коэффициентов фиктивного увеличения массы жесткого контейнера при его разгоне в воде на значительных глубинах и на мелководье.

6. Разработали защищенную патентом конструкцию жесткого плавучего контейнера с учетом использования его в качестве модуля контейнерного состава.

7. Разработали защищенные патентами технические и технологические решения для выполнения загрузки и разгрузки жестких контейнеров, для формирования и расформирования контейнерных составов, а также для применения контейнеров при очистке малых и средних рек от ранее затонувших лесоматериалов.

**Рекомендации.** 1. Предприятиям, заинтересованным в снижении затрат на транспортировку древесного сырья из удаленных районов посредством использования сети малых и средних рек, рекомендуются к использованию технические и технологические решения, предлагаемые в данной работе.

2. Организациям и подразделениям, занимающимся проектированием и планированием мероприятий, связанных с транспортом лесоматериалов, наряду с упомянутыми техническими и технологическими решениями рекомендуется использовать предложенные теоретические и эмпирические зависимости для определения гидродинамических характеристик жестких контейнеров, а также результаты анализа полученных регрессионных моделей.

**Перспективы дальнейшей разработки темы.** Следующие этапы научной работы данной направленности могут быть связаны с исследованием гидродинамических характеристик леек и составов из жестких модулей.

## **Основные положения диссертации опубликованы в работах**

### ***В изданиях из перечня ВАК***

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

2. Кудрявцев Г.В. Результаты исследования разгона жестких плавучих контейнеров / Г.В. Кудрявцев, С.В. Посыпанов. – Текст : непосредственный // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2018. – № 225. – С. 155-167.

### ***Патенты***

3. Патент № 147720 U1 Российская Федерация, МПК B65D88/00. Контейнер : № 2014125335/12 : заявл. 23.06.2014 : опубл. 20.11.2014 / Суров Г.Я., Барбанов В.А., Кудрявцев Г.В. ; заявитель САФУ. – Текст : непосредственный.

4. Патент № 158457 U1 Российская Федерация, МПК В63В 35/58 (2006.01), В65D 88/12 (2006.01). Транспортное средство для перевозки лесных грузов по водным путям : №2015118379/11 : заявл. 15.05.2015 : опубл. 10.01.2016 / Суров Г.Я., Барабанов В.А., Кудрявцев Г.В. ; заявитель САФУ. – Текст : непосредственный.

5. Патент № 2618560 С1 Российская Федерация, МПК В63В 35/62 (2006.01). Способ формирования секций малогабаритных плотов на минирейде : № 2015156635 : заявл. 28.12.2015 : опубл. 04.05.2017 / Посыпанов С.В., Кудрявцев Г.В. ; заявитель САФУ. – Текст : непосредственный.

6. Патент № 187471 U1 Российская Федерация, МПК В63В 35/62 (2018.08). Причал : №2018136143 : заявл. 12.10.2018 : опубл. 06.03.2019 / Посыпанов С.В., Кудрявцев Г.В. ; заявитель САФУ. – Текст : непосредственный.

7. Патент № 163715 U1 Российская Федерация, МПК В63В 35/62 (2006.01). Плот : № 2016103174/11 : заявл. 01.02.2016 : опубл. 10.08.2016 / Посыпанов С.В., Зунин Л.Н., Кудрявцев Г.В. ; заявитель САФУ. – Текст : непосредственный.

8. Патент № 158410 U1 Российская Федерация, МПК В63В 35/62. Плот : № 2015122650/11 : заявл. 11.06.2015 : опубл. 27.12.2015 / Суров Г.Я., Барабанов В.А., Кудрявцев Г.В. ; заявитель САФУ. – Текст : непосредственный.

9. Патент № 147036 U1 Российская Федерация, МПК В65G69/20. Плот : № 2014125331/11 : заявл. 23.06.2014 : опубл. 27.10.2014 / Суров Г.Я., Барабанов В.А., Кудрявцев Г.В. ; заявитель САФУ. – Текст : непосредственный.

### ***В других изданиях***

10. Кудрявцев, Г.В. Обеспечение подobia при моделировании неравномерного движения жестких плавучих контейнеров для круглых лесоматериалов / Г.В. Кудрявцев, С.В. Посыпанов. – Текст : непосредственный // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2015 г. № 5 Ч. 4 (16-4). – С. 303-307.

11. Кудрявцев, Г.В. Оценка составляющей трения в сопротивлении воды равномерному движению лесотранспортных единиц / С.В. Посыпанов, В.Л. Рымашевский, Г.В. Кудрявцев. – Текст : непосредственный // Развитие Северо-Арктического региона: проблемы и решения: материалы научной конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова. – Архангельск: САФУ (университет), 2016. – С. 119-123.

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

13. Кудрявцев, Г.В. Технология очистки малых и средних рек от затонувшей древесины с использованием манипуляторов и баржевых модулей / Г.В. Кудрявцев, С.В. Посыпанов, В.О. Чупраков. – Текст : непосредственный // Ин-

женерные задачи: проблемы и пути решения Сборник материалов Всероссийской (национальной) научно-практической конференции Высшей инженерной школы САФУ: сб. материалов всероссийской (национальной) науч.-практ. конф.. – Архангельск: САФУ (университет), 2019. – С. 138-140.

14. Кудрявцев, Г.В. Новое в доставке лесных грузов по водным путям / Г.Я. Суров, В.А. Барабанов, Г.В. Кудрявцев. – Текст : непосредственный // Фундаментальные и прикладные исследования в России: проблемы и перспективы развития: материалы II всероссийской науч.-практ. конф.. – Ростов-на-Дону: ООО «Приоритет», 2015. – С. 66-71.

15. Кудрявцев, Г.В. Использование мобильного малогабаритного причала при погрузке круглых лесоматериалов в жесткие плавучие контейнеры / С.В. Посыпанов, В.О. Чупраков, Г.В. Кудрявцев. – Текст : непосредственный // Colloquium-journal. – 2019. – № 14-1 (38). – С. 77-79.

16. Кудрявцев, Г.В. Проблемы транспортировки плотов и линеек из плоских сплоточных единиц и контейнеров по криволинейным участкам малых рек / В.А. Барабанов, Г.В. Кудрявцев, А.В. Коробицын. – Текст : непосредственный // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2014. – № 5 Ч.4 (10-4). – С. 24-28.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с указанием фамилии, имени, отчества, почтового адреса, адреса электронной почты, наименования организации и должности, подписанные и заверенные печатью, просим направлять по адресу: 163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины, 17, САФУ им. М.В. Ломоносова, диссертационный совет Д 212.008.01.