

На правах рукописи



Злобин Александр Андреевич

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ БУКСИРОВКИ ПЛОТОВ В ПЕРИОД
ПРОДЛЕННОЙ НАВИГАЦИИ**

05.21.01 – Технология и машины лесозаготовок и
лесного хозяйства

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Архангельск – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный технологический университет» (ФГБОУ ВО СибГТУ).

Научный руководитель: кандидат технических наук, профессор
Корпачев Василий Петрович

Официальные оппоненты: **Карпачев Сергей Петрович**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет леса», кафедра промышленного транспорта и строительства

Жук Артём Юрьевич, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Братский государственный университет», кафедра воспроизводства и переработки лесных ресурсов

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»

Защита состоится 13 апреля 2016 г. в 13:00 на заседании диссертационного Совета Д 212.008.01 на базе ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» по адресу: 163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины, д. 17, ауд. 1220.

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

Автореферат разослан «___» _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета



Земцовский Алексей
Екимович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Среди субъектов РФ наибольший запас древесины приходится на территорию Красноярского края (11 700 млн. м³) и Иркутской области (9 000 млн. м³). Ежегодно в этих субъектах заготавливается порядка 13 млн. м³ и 22 млн. м³, соответственно для Красноярского края и Иркутской области. Интенсивный рост объема сортиментной заготовки древесины и строительство крупных лесоперерабатывающих объектов неизбежно вызовет спрос на водный транспорт леса в плотях.

Продолжительность периода, когда лесосплавные магистрали свободны ото льда, колеблется для большей части территории России от 170 до 260 дней. Перерыв в лесосплаве на длительный срок заставляет создавать обширные склады для хранения лесоматериалов, как предназначенных к сплаву, так и выгружаемых в конечных пунктах приплава. Лесозаготовители вынуждены везти свою продукцию наземным транспортом, несмотря на огромные расстояния.

Россия имеет более чем вековой опыт ледового плавания. С 1976 г проводились исследования с целью продления навигации на внутренних водных путях. К сожалению, уже в 1990-е годы наблюдается резкое сокращение объемов лесозаготовок и повсеместный спад производства в промышленности. Таким образом, проблема круглогодичной навигации на внутренних водных путях осталась не решенной и является актуальной для многих лесозаготовителей.

Данная диссертация посвящена решению конкретного вопроса этой проблемы – Продления периода навигации на примере лесосплавного пути Ангаро-Енисейского региона на основе обоснования параметров буксировки плотов в условиях ледового режима на внутренних водных путях.

Цель работы – Продление периода навигации на примере лесосплавного пути Ангаро-Енисейского региона на основе обоснования параметров буксировки плотов в условиях ледового режима на внутренних водных путях.

Задачи исследования, поставленные в соответствии с целью работы:

- 1) получить теоретическую зависимость скорости обтекания плота водным потоком от геометрических характеристик ледового канала;
- 2) построить математические зависимости для определения закономерности движения водного потока в ледовом канале;
- 3) определить основные параметры подобия и масштаб моделирования при буксировке плота в ледовом канале;
- 4) провести экспериментальные исследования процесса взаимодействия плота с водным потоком и битым льдом при равномерном прямолинейном движении;
- 5) получить математическую модель сопротивления битого льда установившемуся движению плота в ледовом канале;
- 6) провести экономическое обоснование организации лесосплавных работ в период продленной навигации;

7) определить оптимальный способ проводки древесины в плотах в период ледового режима на внутренних водных путях.

Объект исследования. Плотовой лесосплав в ледовых условиях.

Предмет исследования. Математические модели процесса буксировки плота в ледовых условиях.

Методы исследования. При проведении теоретических и экспериментальных исследований использованы основные законы механики, гидромеханики, теория подобия и физического моделирования, π -теорема, методы математического анализа и статистики, методы планирования эксперимента.

Научная новизна диссертационной работы:

– выведена теоретическая зависимость скорости обтекания плота водным потоком от геометрических характеристик ледового канала, отличающаяся возможностью использования полученной зависимости при определении усилия буксировки плота в продленные сроки навигации;

– разработана математическая модель в виде уравнения регрессии, отличающаяся возможностью количественной оценки усилия буксировки в ледовых условиях в зависимости от толщины льда, скорости буксировки, ширины ледового канала и длины плота;

– предложен способ проводки плотов в период ледового режима на внутренних водных путях, отличающийся возможностью организации плотового лесосплава в ледовых условиях.

Положения, выносимые на защиту:

1) теоретическая зависимость скорости обтекания плота водным потоком от геометрических характеристик ледового канала;

2) экспериментальные зависимости полного ледового сопротивления и его составляющих от толщины льда, скорости буксировки, ширины ледового канала и длины плота;

3) способ проводки древесины в плотах в период ледового режима на внутренних водных путях.

Теоретическая значимость.

Полученные зависимости и разработанная математическая модель взаимодействия плота с битым льдом и результаты их исследований дополняют теорию буксировки плота в продленные сроки навигации.

Практическая значимость. Для широкого внедрения технологии организации водного транспорта леса в плотах в период продленной навигации обоснованы параметры буксировки плотов в условиях ледового режима на внутренних водных путях, что позволит не только повысить эффективность водного транспорта леса в плотах, но и исключить объем недоплава древесины в результате непредвиденных метеорологических условий.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертация соответствует специальности 05.21.01 «Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства» по пункту 3 – Разработка операционных технологий и процессов в лесопромышленном и лесохозяйственном производствах: заготовительном, транспортном, складском, обрабатывающем, лесовосстановительном и др.

Достоверность результатов, обеспечивается использованием в работе современных апробированных теоретических подходов с применением математического и экспериментального моделирования; подтверждается их реализацией на моделях, совпадением теоретических и экспериментальных показателей с доверительной вероятностью 0,95 у полученных закономерностей, проверкой адекватности исследований по критериям Стьюдента, Фишера, Кохрена.

Апробация. Основные положения диссертации докладывались на ежегодных научно-технических конференциях СибГТУ, Всероссийских конференциях, межрегиональной конференции «Экологическое образование и природопользование в инновационном развитии региона» (Красноярск, 2013), VI Международная конференция молодых ученых «Инновационные тенденции развития Российской науки» (Красноярск, 2013). Диссертационные исследования поддержаны Фондом Михаила Прохорова в виде предоставленного гранта в рамках конкурса для студентов, аспирантов и молодых преподавателей «Академическая мобильность» в 2012 году. Полученные средства направлены на проведение исследований в ААНИИ.

Личное участие автора в получении результатов. Теоретические и экспериментальные исследования, представленные в диссертации, проводились лично автором. Автором произведены обработка экспериментальных данных, анализ, обоснование экономической эффективности предлагаемых в работе технологических решений и опубликовании результатов исследования.

Реализация результатов работы. Результаты исследования внедрены в деятельность ООО «Пашутинский ЛПХ» и используются в учебном процессе при выполнении лабораторных работ студентами СибГТУ обучающимися по направлению 35.03.02 «Технология лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств».

Публикации. Основное содержание диссертации отражено в 24 научных работах объемом 4,61 п.л., авторский вклад 60%, в том числе 6 статей в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России и две работы депонированы в базу данных Всероссийского института научной и технической информации (ВИНИТИ), опубликован 1 патент на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, библиографического списка, включающего 132 наименования и 4 приложения. Работа изложена на 126 страницах машинописного текста, содержит 27 рисунков, 50 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы ее цель, научная новизна, объект и предмет исследования, задачи исследования, научные положения, выносимые на защиту и практическая значимость результатов исследования.

В первой главе диссертации рассматривается состояние проблемы плотового лесосплава в продленные сроки навигации.

Над созданием и совершенствованием технологии и технического обеспечения водного транспорта леса работали ЦНИИЛесосплава, ВКНИИВОЛТ, ЛИИВТ, ГИИВТ, кафедры водного транспорта леса ЛТУ, МГУЛ, АГТУ, СибГТУ, ПГТУ и других вузов, коллективы речных пароходств и многочисленные инженерные кадры специалистов-практиков, а именно: В. И. Патякин, А. А. Камусин, А. Н. Минаев, М. М. Овчинников, К. Б. Соколов, В. К. Курьянов, В. Н. Худоногов, В. П. Корпачев, В. Я. Харитонов и др.

Выполнен анализ средств и методов борьбы со льдами полученный благодаря работам ААНИИ, ЦКБ МТ «РУБИН», ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, AWI (Германия), NSF (США), CRREL (США), NRC Institute for Ocean Technology (Канада), Aker Arctic (Финляндия) и др.

Рассмотрен вопрос специфики ледового режима водоемов и водотоков с подробным анализом гидрологии лесосплавных рек Ангаро-Енисейского региона. Значительный вклад в изучение этих вопросов внесли ученые А. П. Браславский, Я. Л. Готлиб, В. М. Жидких, А. Г. Колесников, А. П. Пехович, Ф. И. Быдин, П. Н. Белоконь, Р. В. Донченко. За рубежом наиболее крупные исследования ледового режима водоемов и водотоков суши связаны с именами О. Девика, Р. Ларсена, В. Матоушека, Б. Мишеля, Т. Остеркемпа, Л. Вотрубь, Дж. Эштона, К. Карея, Ж. Кеннеди, Е. Паризе, Р. Оссера, М. Юзюнера. Изучением вопросов ледоколостроения занимались Л. М. Ногид, Б. П. Ионов, В. И. Каштелян, Д. Е. Хейсин, Е. С. Виноградов, В. А. Лихоманов, В. А. Зуев.

Всесторонний анализ, проведенный в первой главе, показал, что не изученным остается вопрос взаимодействия плота с битым льдом во время его буксировки в период ледового режима на внутренних водных путях.

Во второй главе приведено теоретическое обоснование процессов, происходящих при установившемся прямолинейном движении плота в ледовом канале.

Соппротивление льда установившемуся движению плота рассматривается как дополнительное к сопротивлению плота в чистой воде, разделяя, таким образом, полное ледовое сопротивление $R_{\text{л}}$ на водное сопротивление движению плота $R_{\text{в}}$ и так называемое чистое ледовое сопротивление $R_{\text{лч}}$

$$R_{\text{л}} = R_{\text{в}} + R_{\text{лч}}. \quad (1)$$

Волновое сопротивление при этом не учитывается в виду его незначительной составляющей из-за гашения энергии волн плавающим ледовым материалом в поверхностном слое воды.

Определим скорость движения потока, стесненного ледяным покровом при наличии в нем канала (рисунок 1)

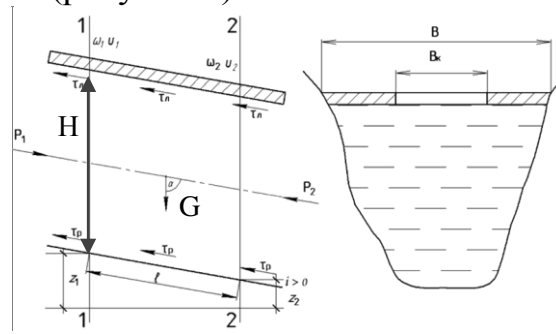


Рисунок 1 – Расчетная схема для вывода уравнения движения потока под ледяным покровом: B – ширина русла, B_k – ширина ледового канала; ω_1, ω_2 – площадь живого сечения потока в сечениях 1-1, 2-2, соответственно; v_1, v_2 – скорость потока в сечениях 1-1, 2-2, соответственно; τ_p, τ_l – удельная сила трения потока о стенки русла и нижней поверхности ледяного покрова, соответственно; P_1, P_2 – давление в центрах тяжести живого сечения 1-1, 2-2, соответственно; l – длина рассматриваемого участка; z_1, z_2 – геометрический напор в сечениях 1-1, 2-2, соответственно

Для вывода скорости потока в канале, воспользуемся уравнением равновесия действующих сил в сечениях 1-1, 2-2.

$$F_1 - F_2 + G \cos \alpha - T_p - T_l = 0, \quad (2)$$

где F_1, F_2 – сила гидродинамического давления в сечениях 1-1, 2-2, соответственно; T_p, T_l – сила трения потока о стенки русла и нижней поверхности ледяного покрова, соответственно; G – сила тяжести отсека, $G = \rho g \omega l$.

Подставим значения действующих сил в уравнение (1) и разделим все члены уравнения на $\rho g \omega$, получим

$$\frac{P_1}{\rho g} - \frac{P_2}{\rho g} + z_1 - z_2 = \frac{\tau_p \chi_p l}{\rho g \omega} + \frac{\tau_l \chi_l l}{\rho g \omega}. \quad (3)$$

Из уравнения Бернулли для сечений 1-1 и 2-2, получим

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{\rho g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{\rho g} + z_2 + h_w, \quad (4)$$

где h_w – потери напора при движении потока на участке l .

Так как $\omega_1 = \omega_2 = \omega$, $v_1 = v_2$ и, принимая $\alpha_1 = \alpha_2$, уравнение (4) примет вид:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{P_2}{\rho g} + z_1 - z_2 = h_w. \quad (5)$$

Сопоставляя уравнения (3) и (5), получим

$$\frac{\tau_p \chi_p l}{\rho g \omega} + \frac{\tau_l \chi_l l}{\rho g \omega} = h_w. \quad (6)$$

Введем в уравнение (6) значение гидравлического уклона $I = h_w/l$, гидравлического радиуса смоченного периметра ледяного покрова r_l и

смоченного периметра русла r_p и отношение $\alpha_r = \frac{r_l}{r_p}$, получим

$$\frac{\tau_p}{\alpha_r \rho g} + \frac{\tau_l}{\rho g} = I r_l. \quad (7)$$

$$\frac{\tau_p}{\alpha_r \rho g} + \frac{\tau_l}{\rho g} = K_n v_l^2, \quad (8)$$

где K_n – коэффициент пропорциональности; v_l – скорость движения потока при наличии ледяного покрова и канала в нем.

$$\text{Тогда } I r_l = K_n \cdot v_l^2, \quad v_l = \sqrt{\frac{1}{K_n}} \sqrt{I r_l} = c_l \sqrt{I r_l},$$

где c_l – коэффициент Шези для потока с ледяным покровом и наличием в нем канала;

$$c_{np} = \frac{1}{n_{np}} H^{1/6} = \frac{c_p}{(1 + \alpha_n^{1.5})^{2/3}} \quad (9)$$

n_{np} – приведенный коэффициент шероховатости для потока под ледяным покровом (10)

$$n_{np} = \frac{n_l \chi_l + n_p \chi_p}{\chi_l + \chi_p}. \quad (10)$$

где n_l , n_p – коэффициент шероховатости льда и русла, соответственно; χ_l , χ_p – смоченный периметр льда и русла, соответственно;

Гидравлический радиус r_l при наличии канала во льду равен

$$r_l = \frac{BH}{2(B+H) - B_k}. \quad (11)$$

Введя относительную глубину $m = H/B$ и относительную ширину прорези канала $m' = B_k/B$, получим

$$r_l = \frac{mB}{2(1+m) - m'}. \quad (12)$$

Подставляя значение гидравлического радиуса r_l (12), и коэффициента Шези c_l (9) в формулу (8), получим скорость движения потока при наличии канала во льду v_l

$$v_l = \frac{1}{n_{np}} H^{1/6} \sqrt{\frac{ImB}{2(1+m) - m'}}. \quad (13)$$

При ограниченных габаритах пути наблюдается резкое изменение скоростей в пограничной, потенциальной и вихревой областях потока, обтекающего тело, а, следовательно, происходит перераспределение давления потока, окружающего тело (рисунок 2).

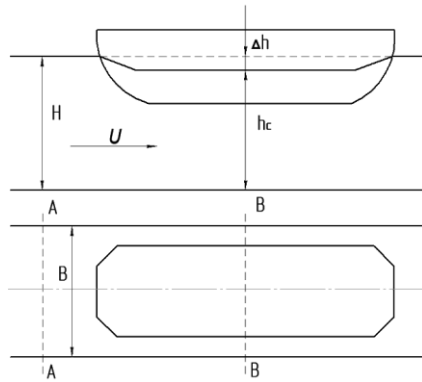


Рисунок 2 – Схема движения тела в ограниченных условиях: H , h_c – глубина потока соответственно в нестесненной части и в мидели; Δh – величина понижения уровня

В районе движения плота наблюдается понижение уровня Δh , и увеличение скорости Δv . Скорость в стесненном сечении потока $v_c = v + \Delta v$.

Для определения скорости v_c воспользуемся уравнением Бернулли, записанным для сечений AA и BB:

$$H + \frac{v^2}{2g} = (H - \Delta h) + \frac{v_c^2}{2g} \quad (14)$$

Для определения v_c необходимо установить величину понижения уровня воды Δh в сечении BB. Величина Δv может быть определена из уравнения неразрывности

$$v\omega = (v + \Delta v)\omega_c, \quad (15)$$

где ω , ω_c – площадь поперечного сечения потока и площадь сжатого поперечного сечения потока, соответственно.

Площадь потока, стесненного судном, определится выражением

$$\omega_c = \omega - \Omega - b\Delta h, \quad (16)$$

где Ω – площадь погруженной части корпуса судна по мидель шпангоуту; b – средняя ширина канала, вычисляемая по выражению $b = \omega/H$.

Считая произведение $(\Delta h b)$ малым по сравнению с площадью ω , им можно пренебречь. Тогда, подставляя (16) в (15) и решая относительно Δv , получим

$$\Delta v = v \frac{\Omega}{\omega - \Omega} = v \kappa_{\text{пр}} \frac{1}{\kappa_{\text{пр}} - 1}, \quad (17)$$

где $\kappa_{\text{пр}} = \omega / \Omega$ – профильный коэффициент;

Подставляя в уравнение (14) значение $v_c = v + \Delta v$ и, решая относительно Δh , получим

$$\Delta h = \frac{1}{g} \left(v + \frac{\Delta v}{2} \right) \Delta v. \quad (18)$$

Подставляя значение Δv (17) в формулу (18), получим

$$\Delta h = \frac{v^2}{g} \frac{\kappa_{\text{пр}} - 0,5}{(\kappa_{\text{пр}} - 1)^2}. \quad (19)$$

Значение скорости потока в стесненном сечении с учетом величины Δh (20) получим из уравнения (14)

$$v_c = \frac{2v}{\kappa_{\text{пр}} - 1} \sqrt{2\kappa_{\text{пр}} - 1} \quad (20)$$

В выведенную формулу (20) подставив ранее выведенную $v_{\text{л}}$ (13), получим (21)

$$v_{\text{л}}^c = \frac{2}{n_{\text{пр}}(\kappa_{\text{пр}} - 1)} H^{1/6} \sqrt{\frac{\text{Im}B}{2(1+m) - m'}} \sqrt{2\kappa_{\text{пр}} - 1} \quad (21)$$

В третьей главе приведены программа экспериментальных исследований, применяемое оборудование, методика проведения исследований, обоснованы условия моделирования, выбран масштаб моделирования, проведена оценка точности измерений.

Опыты проводились по закону моделирования Фруда $F_r = v_{\text{л}}^2 / gL_{\text{пл}}$ в масштабе 1:15. Исследования ледового сопротивления движению плота в ледовом канале $B_k > B_{\text{пл}}$ проводились с использованием ПВД в качестве материала имитирующего битый лед, и с использованием натурального льда. Опыты с использованием ПВД проводились в гидрлотке кафедры ИВР СибГТУ (рисунок 3, таблица 1).

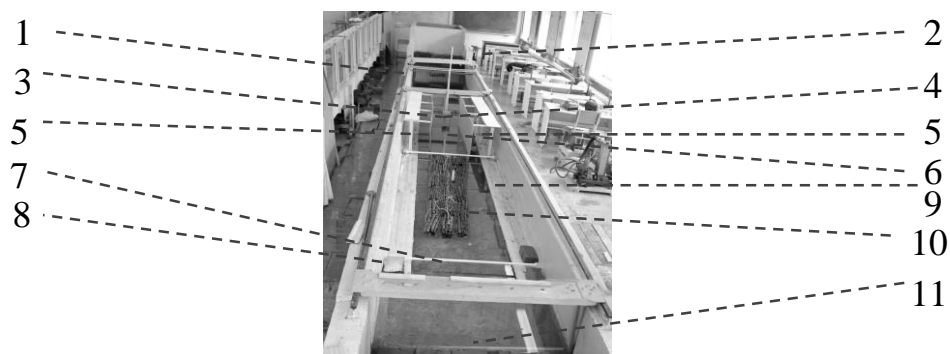


Рисунок 3 – Экспериментальная лабораторная установка для исследования $R_{\text{л}}$,

$R_{\text{лч}}$, $R_{\text{в}}$: 1 – гидрлоток, 2 – вентиль, 3 - динамометр e-scale 20, 4 – гидрометрическая микровертушка ГМЦМ–1, 5 – направляющие равномерной подачи битого льда, 6 – трос, 7 – распорки, 8 – канал, 9 – кромка канала их ПВД, 10 – модель сегмента плота, 11 – ледозадерживающая сетка

Опыты с использованием натурального льда проводились в полевых условиях озера на острове Татышева реки Енисей ($56^{\circ}01'43''\text{N}$ $92^{\circ}56'47''\text{E}$) (таблица 1).

Исследования ледового сопротивления движению плота в ледовом канале $B_k < B_{\text{пл}}$ проводились в ледовом бассейне ААНИИ с использованием моделированного льда (таблица 1).

Таблица 1 – Уровни и интервалы варьирования факторов

Управляемые факторы		$V_k > V_{пл}$				$V_k < V_{пл}$ в 2 раза	
		скорость буксировки модели $v_{пл}$, м/с	длина модели $L_{пл}$, м	отношение ширины канала к ширине модели K^B	толщина льда h_l , м	$v_{пл}$, м/с	h_l , м
Уровни	-1	0,1	0,8	1,2	0,007	0,1	0,015
	0	0,2	1,6	1,6	0,012	0,2	0,0185
	+1	0,3	2,4	2	0,017	0,3	0,022
Интервал варьирования		0,1	0,8	0,4	0,005	0,1	0,0035
Контролируемые факторы, Н		R_B – усилие буксировки плота по чистой воде. R_L – полное ледовое усилие буксировки плота в ледовом канале. $R_{лч}$ – чистое ледовое сопротивление установившемуся движению плота в канале ($R_{лч} = R_L - R_B$).					
Функциональные зависимости		$R_L = f(v_{пл}, L_{пл}, K^B, h_l)$; $R_{лч} = f(v_{пл}, L_{пл}, K^B, h_l)$; $R_B = f(v_{пл}, L_{пл}, K^B, h_l)$.				$R_L = f(v_{пл}, h_l)$; $R_{лч} = f(v_{пл}, h_l)$; $R_B = f(v_{пл}, h_l)$.	
Входные регулируемые параметры		$x_1 = \frac{L_{пл} - 1,6}{0,8}$; $x_2 = \frac{h_l - 0,012}{0,005}$; $x_3 = \frac{v_{пл} - 0,2}{0,1}$; $x_4 = \frac{K_B - 1,6}{0,4}$.				$x_1 = \frac{v_{пл} - 0,2}{0,1}$; $x_2 = \frac{K_B - 0,0185}{0,0035}$	

Модельные пределы изменения управляемых факторов приняты с учетом (таблица 1): рекомендуемых скоростей буксировки плота ($v_{пл} = 0,5 - 2$ м/с); ограниченности лабораторных условий ($L_{пл} = 0,8 - 2,4$ м); теоретического анализа процесса установившегося движения плота в ледовом канале ($K^B = 1,2 - 2$); соответствия оптимальным толщинам льда для организации лесосплавных работ в период продленной навигации ($h_l = 0,1 - 0,4$ м).

При использовании полиэтилена высокого давления, получены следующие уравнения регрессии ($V_k > V_{пл}$):

$$R_L = 3,4 + 0,697 x_1 + 1,024 x_2 + 0,305 (x_1 \cdot x_2) + 0,352 x_2^2 + 2,283 x_3 + 0,474 (x_1 \cdot x_3) + 0,719 (x_2 \cdot x_3) + 0,205 (x_1 \cdot x_2 \cdot x_3) + 0,198 (x_2^2 \cdot x_3) - 0,59 x_4 - 0,155 (x_2 \cdot x_4) - 0,392 (x_3 \cdot x_4). \quad (22)$$

$$R_B = 2,102 + 0,245 x_1 + 1,463 x_3 + 0,157 (x_1 \cdot x_3) - 139 x_3^2 - 0,445 x_4 - 0,432 (x_3 \cdot x_4) - 0,132 (x_3^2 \cdot x_4) + 0,066 (x_1^2 \cdot x_3 \cdot x_4) + 0,124 (x_3^2 \cdot x_4). \quad (23)$$

$$R_{лч} = 0,798 + 0,442 x_1 + 0,094 x_1^2 + 1,024 x_2 + 0,306 (x_1 \cdot x_2) + 0,399 x_2^2 + 0,112 (x_1 \cdot x_2^2) + 0,757 x_3 + 0,317 (x_1 \cdot x_3) + 0,719 (x_2 \cdot x_3) + 0,205 (x_1 \cdot x_2 \cdot x_3) + 0,198 (x_2^2 \cdot x_3) + 0,281 x_3^2 - 0,074 (x_1^2 \cdot x_3^2) - 0,071 (x_2^2 \cdot x_3^2) - 0,088 (x_1 \cdot x_2^2 \cdot x_3^2) - 0,095 x_4 - 0,097 (x_1 \cdot x_4) - 0,155 (x_2 \cdot x_4) - 0,077 (x_1 \cdot x_2 \cdot x_4) - 0,075 (x_2^2 \cdot x_4) + 0,04 (x_3 \cdot x_4) - 0,05 (x_1 \cdot x_3 \cdot x_4) - 0,111 (x_2 \cdot x_3 \cdot x_4) - 0,038 (x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4) + 0,131 (x_3^2 \cdot x_4) + 0,078 x_4^2 - 0,111 (x_1 \cdot x_4^2) + 0,049 (x_3 \cdot x_4^2) - 0,074 (x_3^2 \cdot x_4^2) + 0,111 (x_1 \cdot x_3^2 \cdot x_4^2). \quad (24)$$

При использовании натурального льда, получены следующие уравнения регрессии ($B_k > B_{пл}$):

$$R_{л} = 0,874 + 0,074 \cdot x_1 + 1,666 \cdot x_2 + 0,216(x_1 \cdot x_2) + 1,465 \cdot x_2^2 + 0,199(x_1 \cdot x_2^2) + 0,091(x_1^2 \cdot x_2^2) + 0,102 \cdot x_3 + 0,179(x_1^2 \cdot x_2 \cdot x_3) + 0,141(x_1^2 \cdot x_2^2 \cdot x_3) - 0,199 \cdot x_4^2 - 0,102(x_2 \cdot x_4^2). \quad (25)$$

$$R_{в} = 0,503 + 0,059 \cdot x_1 + 0,013 \cdot x_1^2 + 0,07 \cdot x_3 + 0,014 \cdot x_3^2 - 0,032 \cdot x_4 - 0,011(x_2^2 \cdot x_3 \cdot x_4). \quad (26)$$

$$R_{лч} = 0,357 + 1,607 \cdot x_2 + 0,216(x_1 \cdot x_2) + 0,089(x_1^2 \cdot x_2) + 1,47 \cdot x_2^2 + 0,214(x_1 \cdot x_2^2) + 0,079(x_1^2 \cdot x_2^2) + 0,045(x_1 \cdot x_2 \cdot x_3) + 0,18(x_1^2 \cdot x_2 \cdot x_3) + 0,048(x_1 \cdot x_2^2 \cdot x_3) + 0,143(x_1^2 \cdot x_2^2 \cdot x_3) - 0,029(x_1 \cdot x_4) - 0,203 \cdot x_4^2 - 0,105(x_2 \cdot x_4^2) + 0,041(x_2^2 \cdot x_3 \cdot x_4^2). \quad (27)$$

При использовании моделированного льда в ААНИИ, получены следующие уравнения регрессии ($B_k < B_{пл}$):

$$R_{л} = 56,9 + 8,9 x_1 + 14,3 x_2. \quad (28)$$

$$R_{в} = 1,33 + 1,37 x_1 + 0,58 x_1^2. \quad (29)$$

$$R_{лч} = 55,18 + 7,54 x_1 + 14,3 x_2. \quad (30)$$

В четвертой главе представлены результаты анализа теоретико-экспериментальных исследований в виде графиков и выводов.

По результатам исследования зависимостей $R_{л}$, $R_{в}$, $R_{лч}$ от $L_{пл}$, $h_{л}$, $u_{пл}$, $K_{в}$ при $B_k > B_{пл}$ построены графики и сделаны выводы (рисунки 4 – 7):

1. При изменении длины модели $L_{пл}$ от 0,8 до 2,4 м полное ледовое сопротивление $R_{л}$ увеличивается на 36,4% (на 32% для ПВД).

2. При изменении толщины льда $h_{л}$ от 0,007 до 0,017 м полное ледовое сопротивление $R_{л}$ увеличивается в 2 раза (на 39% для ПВД).

3. При изменении скорости буксировки $u_{пл}$ от 0,1 до 0,3 полное ледовое сопротивление $R_{л}$ увеличивается в 6 раз (в 4,5 раза для ПВД).

4. При изменении отношения ширины канала к ширине модели $K_{в}$ от 1,2 до 2 полное ледовое сопротивление $R_{л}$ уменьшается на 25,5% (на 37% для ПВД).

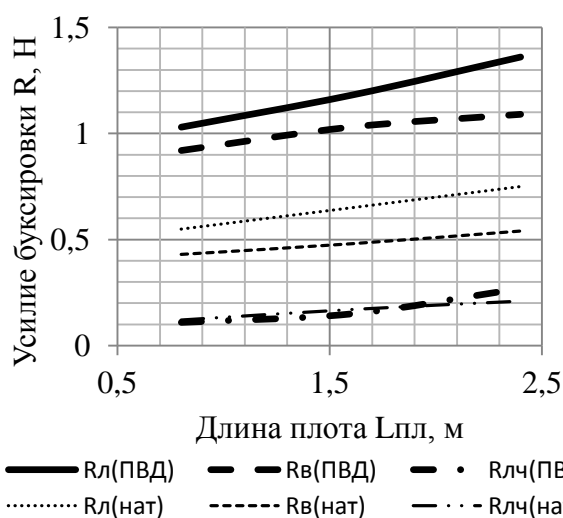


Рисунок 4– График зависимости $R_{л}$, $R_{в}$, $R_{лч}$ от $L_{пл}$

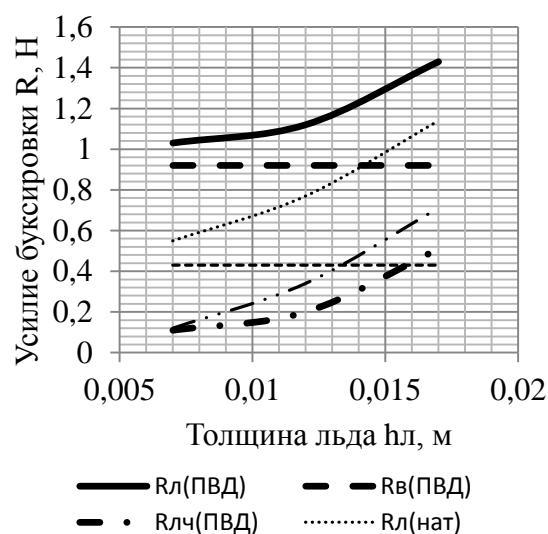
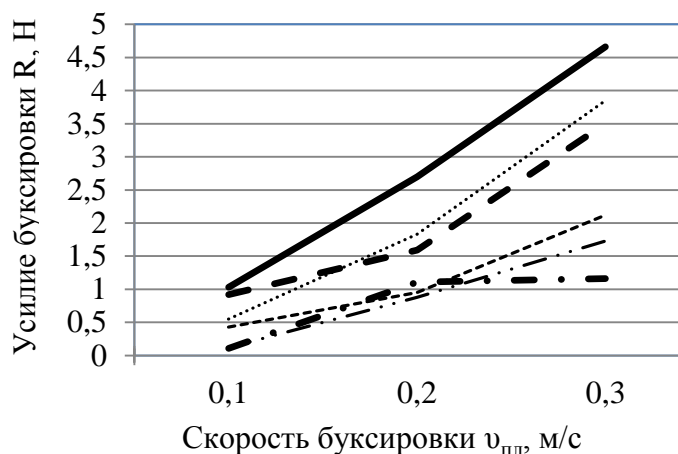
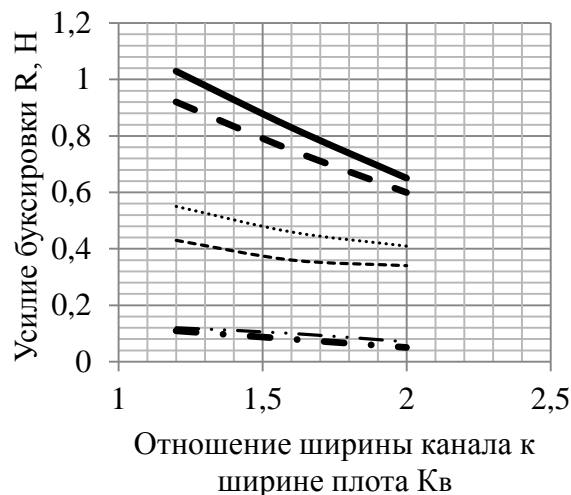


Рисунок 5 – График зависимости $R_{л}$, $R_{в}$, $R_{лч}$ от $h_{л}$



— R_l (ПВД) - - R_v (ПВД)
 - • $R_{лч}$ (ПВД) R_l (нат)
 - - - R_v (нат) - · - $R_{лч}$ (нат)

Рисунок 6 – График зависимости R_l , R_v , $R_{лч}$ от $v_{пл}$



— R_l (ПВД) - - R_v (ПВД) - • $R_{лч}$ (ПВД)
 R_l (нат) - - - R_v (нат) - · - $R_{лч}$ (нат)

Рисунок 7 – График зависимости R_l , R_v , $R_{лч}$ от K_v

По результатам исследования зависимостей R_l , R_v , $R_{лч}$ от h_l , $v_{пл}$, при $V_k < V_{пл}$ построены графики (рисунок 8, 9).

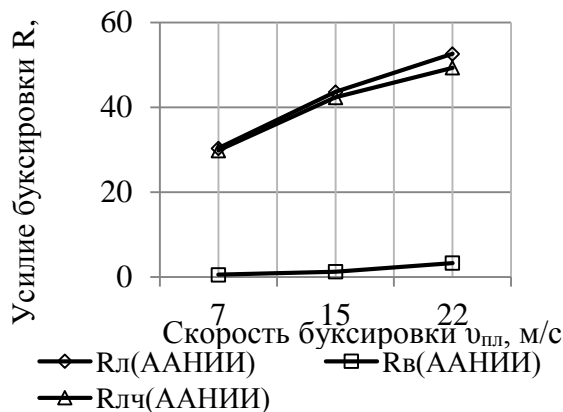


Рисунок 8 – График зависимости R_l , R_v , $R_{лч}$ от $v_{пл}$ (моделированный лед ААНИИ)

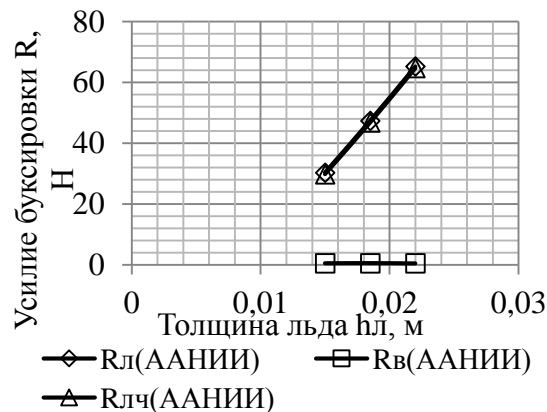


Рисунок 9 – График зависимости R_l , R_v , $R_{лч}$ от h_l (моделированный лед ААНИИ)

По результатам графиков (рисунок 8, 9) можно сделать выводы.

1. При скорости буксировки $v_{пл}$ от 0,1 до 0,3 полное ледовое сопротивление R_l увеличивается на 73,4%, при этом $R_{лч}$ составляет 93,7% – 98,2% от R_l .

2. При изменении толщины льда h_l от 0,015 до 0,022 м полное ледовое сопротивление R_l увеличивается в 2,1 раза, при этом $R_{лч}$ составляет 98,2% – 99,2% от R_l .

Использование натурального льда позволило получить результаты максимально приближенные к натурным условиям буксировки плота в ледовых условиях. Результаты буксировки плота в условиях доламывания канала буксируемым плотом свидетельствуют о нецелесообразности

применения данного способа проводки плотов, по причине возрастания тягового усилия в 10 раз по сравнению с усилием буксировки по чистой воде.

Усилие буксировки плота в ледовых условиях будет отличным от усилия буксировки по чистой воде на величину $K_{л} = \frac{R_{л}}{R_{в}}$. На рисунках 10; 11

представлены графики зависимости $K_{л}$ от наиболее значимых факторов буксировки плота в период ледового режима: $h_{л}$, $v_{пл}$, построенные по уравнениям регрессии (25; 26; 27). Расчеты проводились на примере Ангарского плота $L \times B \times T$, м (600 x 22 x 0,7) при усредненном значении $K_{в} = 1,6$.

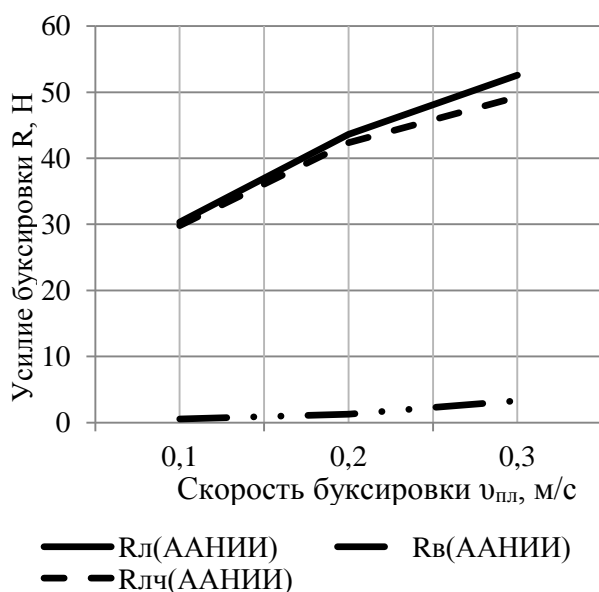


Рисунок 10 – График зависимости $R_{л}$, $R_{в}$, $R_{лч}$ от $v_{пл}$ (моделированный лед ААНИИ)

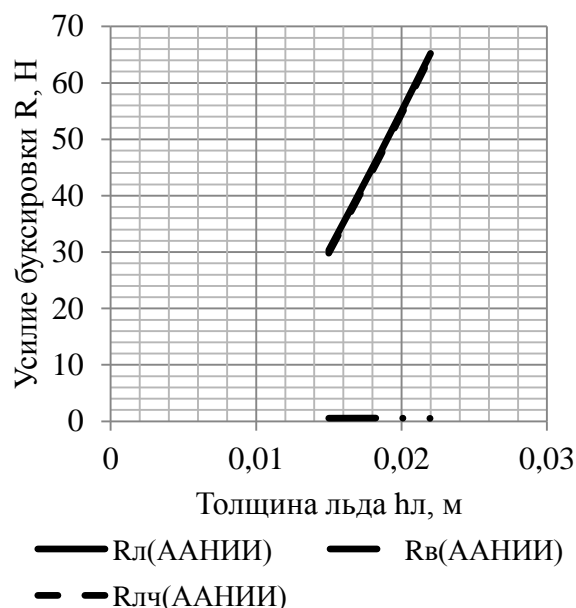


Рисунок 11 – График зависимости $R_{л}$, $R_{в}$, $R_{лч}$ от $h_{л}$ (моделированный лед ААНИИ)

По результатам пересчета результатов тягового усилия буксировки с модели на натуре получены выводы:

1. При изменении толщины льда $h_{л}$ от 0,1 до 0,4 м коэффициент ледового сопротивления $K_{л}$ изменяется от 1,2 до 3,6.

2. При изменении скорости буксировки $v_{пл}$ от 0,4 до 1,2 м/с коэффициент ледового сопротивления $K_{л}$ изменяется от 1,2 до 2,8.

В пятой главе дана оценка экономической эффективности применения полученных результатов исследования на примере лесосплавного пути ООО «Пашутинский ЛПХ». Для организации плотового лесосплава в продленные сроки навигации, обязательным является обеспечение незамерзающей акватории на лесосплавном рейде и рейде приплыва, что требует дополнительных капиталовложений, которые окупаемы при увеличении срока навигации с 120 до 205 суток.

Основные выводы и рекомендации

Выводы

1. Получена теоретическая формула определения скорости потока в ледовом канале при движении в нем плота, учитывающая наличие

дополнительной шероховатости нижней поверхности ледового покрова и сжатие потока кромкой ледового канала, позволяющая использовать полученную зависимость при определении усилия буксировки плота в продленные сроки навигации.

2. В результате исследований получены математические модели в виде уравнений регрессии для полного ледового сопротивления и его составляющих в ледовом канале шириной большей ширины плота и меньшей ширины плота, позволяющие количественно оценить усилие буксировки в ледовых условиях.

3. Определено количественное и качественное влияние входных факторов в виде графических зависимостей тягового усилия от длины модели, толщины льда, скорости буксировки, отношения ширины ледового канала к ширине плота. Наибольшее влияние на ледовое сопротивление оказывают толщина льда и скорость буксировки. Графически представлены результаты тягового усилия, пересчитанные на натуре в виде коэффициента ледового сопротивления. Полученные зависимости позволяют количественно определять степень влияния исследуемых факторов, на общее ледовое сопротивление.

4. Проведено обоснование экономической эффективности организации лесосплавных работ в продленный период навигации на примере ООО «Пашутинский ЛПХ». Эксплуатационные затраты на 1 м³ сплаваемой древесины снизятся на 11 % за счет продления срока навигации с 120 дней до 205 дней и увеличения объема сплаваемой древесины с 100 тыс. м³ до 166,5 тыс. м³. Прибыль при этом увеличится на 71 %. Срок окупаемости капиталовложений составит 72-75 дней.

4. Определен способ проводки плотов в период ледового режима на внутренних водных путях, отличающейся возможностью организации плотового лесосплава в продленные сроки навигации.

Рекомендации производству

1. Не рекомендуется буксировка плота в условиях доламывания кромок канала плотом (ширина канала меньше ширины плота). При отношении ширины плота к ширине канала 2:1 усилие буксировки возрастает в 30 раз. Такой результат не имеет практического применения, так как в мире отсутствуют речные ледаколы такой мощности.

2. Полученные результаты исследования ледового сопротивления рекомендуются при организации плотового лесосплава на лесосплавных реках Ангаро-Енисейского региона в продленный период навигации преимущественно в ранневесенний и позднесенний периоды навигации.

3. Для буксировки плотов в условиях ледового режима на внутренних водных путях рекомендуется использование буксировщика класса «Р» (лед), мощностью не менее $W=300\text{кВт}$.

4. При толщине льда от 0,05 до 0,4 м скорость буксировки снижается с 0,8 м/с до 0,6 м/с, при этом усилие буксировки возрастает на 2%. При таких

условиях рекомендуется не предъявлять дополнительных требований к такелажу.

Список работ, опубликованных по теме диссертации.

В патентах

1. Пат. 2554727 Российская Федерация МПК В63В35/00. Способ проводки древесины в плотях в период ледового режима на внутренних водных путях [Текст] / Корпачев В.П., Злобин А.А., Ушанов С.В., Андрияс А.А., Пережилин А.И., Максимова Е.М., Меньшиков Д.А.; заявитель и патентообладатель Сиб. Гос-ный техн. Ун-т. – № 2014110837/11; заявл. 20.03.2014; опубл. 27.06.2015; бюл. №35. – 5с.

В изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России

2. Корпачев, В. П. Обоснование условий моделирования движения плота в ледовом канале [Текст] / В. П. Корпачев, А. А. Злобин // Хвойные бореальные зоны. – Красноярск: СибГТУ, 2012. – том XXX №3-4. – С. 366 – 369. (0,29/0,15).

3. Корпачев, В. П. Закономерности движения водного потока при движении плота в условиях продленной навигации [Текст] / В. П. Корпачев, А. А. Злобин // Вестник КрасГАУ. – Красноярск, 2012. – №10. – С. 159 – 166. (0,31/0,2).

4. Злобин, А. А. Влияние ширины ледового канала на изменение скорости потока в условиях продленной навигации [Электронное издание] / А. А. Злобин // Электронный журнал: Современные проблемы науки и образования. – 2012. – №4. – URL: www.science-education.ru/104-6563 (дата обращения: 30.09.2012). (0,25/0,15).

5. Злобин, А. А. Обработка опытных данных сопротивления битого льда движению плота в условиях продленной навигации [Текст] / А. А. Злобин, В. П. Корпачев, С. В. Ушанов // Фундаментальные исследования. – М. : Академия Естествознания, 2013. – № 10, часть 5. – С. 978-981. (0,33/0,20).

6. Корпачев, В. П. Взаимодействие плота с битым льдом во время проведения лесосплавных работ в продленный период навигации [Текст] / В. П. Корпачев, А. А. Злобин, С. В. Ушанов // Фундаментальные исследования. – М., 2014. – №5, часть 1. – С. 29-33. (0,25/0,15).

7. Злобин, А. А. Результаты исследования ледового сопротивления движению плота в условиях доламывания кромок канала плотом [Текст] / А. А. Злобин // Фундаментальные исследования. – М., 2014. – №10, часть 2. – С. 260-264. (0,30/0,15).

Депонированные в ВИНТИ

8. Злобин, А. А. Оценка сроков продления навигации с целью лесосплава на внутренних водных путях Ангаро-Енисейского района [Текст] / А. А. Злобин, Е. М. Максимова. – М. : ВИНТИ. 2012. – 8 с. (0,38/0,25).

9. Злобин, А. А. Технические средства и методы разрушения льда при организации лесосплавных работ в период продленной навигации на внутренних водных путях [Текст] / А. А. Злобин, Е. М. Максимова. – М. : ВИНТИ. 2012. – 13 с. (0,58/0,45).

В статьях, материалах конференций

10. Злобин, А. А. Продление навигации лесосплава на внутренних водных путях за счет прокладки канала во льду в ранне-весенний и осенний периоды [Текст] / «Экология. Рациональное природопользование» - Региональная очно-заочная экологическая конференция. Сборник статей. – Красноярск: СибГТУ, 2011. – С. 24 – 27. (0,14).

11. Злобин, А. А. Определение скорости потока в ледовом канале при движении плота в условиях продленной навигации [Текст] / А. А. Злобин, Е. М. Максимова // Сборник статей по материалам Всероссийской научно-практической конференции «Лесной и химический комплексы – проблемы и решения» – Красноярск : СибГТУ, 2012. – Том 1 – С. 112 – 115. (0,12/0,05).

12. Злобин, А. А. Особенности моделирования льда при проведении лабораторных экспериментальных исследований сопротивления движения плота в период продленной навигации [Текст] / А. А. Злобин, Е. М. Максимова // Сборник статей по материалам Всероссийской научно-практической конференции «Лесной и химический комплексы – проблемы и решения» – Красноярск : СибГТУ, 2012. – Том 1 – С. 103 – 105. (0,1/0,05).

13. Злобин, А. А. Проведение экспериментов по определению сопротивления битого льда движению плота в условиях продленной навигации на внутренних водных путях [Текст] / А. А. Злобин, Е. М. Максимова // Сборник статей по материалам II Всероссийской научно-практической «Экология, рациональное природопользование и охрана окружающей среды» – Лесосибирск : СибГТУ, 2012. – С. 260 – 262. (0,1/0,05).

14. Злобин, А. А. Обоснование и проведение эксперимента по определению сопротивления битого льда движению плота в период продленной навигации путях [Текст] / А. А. Злобин, Е. М. Максимова // Экология. Рациональное природопользование - Региональная очно-заочная экологическая конференция. Сборник статей. – Красноярск: СибГТУ, 2012. – С. 54 – 58. (0,15/0,10).

15. Злобин, А. А. Влияние особенностей ледового режима внутренних водных путей на продление навигации с целью лесосплава [Текст] / А. А. Злобин, Е. М. Максимова // Материалы Международной научной конференции «Новые идеи нового век» – Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2013. – Т. 2 – С. 285 – 287. (0,22/0,11).

16. Злобин, А. А. Проведение эксперимента в полевых условиях по определению сопротивления битого льда движению плота [Текст] / А. А. Злобин, Е. М. Максимова // Материалы Международной научной конференции «Новые идеи нового век» – Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2013. – Т. 2 – С. 288 – 293. (0,20/0,10).

17. Злобин, А. А. Исследование ледового сопротивления движению плота в ледовом бассейне ААНИИ [Текст] / А. А. Злобин, Е. М. Максимова // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Молодые ученые в решении актуальных проблем науки». – Красноярск : Изд-во СибГТУ, 2013. – Т. 1 – С. 119 – 122. (0,22/0,11).

18. Злобин, А. А. Эволюция ледового канала в период продленной навигации проводки плотов [Текст] / А. А. Злобин, Е. М. Максимова // Материалы Межрегиональной научно-практической конференции «Экологическое образование и природопользование в инновационном развитии региона». – Красноярск : Изд-во СибГТУ, 2013. – Т. 1 – С. 107 – 109. (0,18/0,1).

19. Злобин, А. А. Обоснование условий моделирования движения плота в период продленной навигации [Текст] / А. А. Злобин // Материалы международной научной конференции / Поволж. кооп. ин-т / Российского ун-та кооперации. – Энгельс: Ред.-изд. Центр ПКИ, 2013. – С. 260-262. (0,12).

20. Злобин, А. А. Проведение исследований сопротивления битого льда движению плота в условиях продленной навигации [Текст] / А. А. Злобин // Инновационные тенденции развития российской науки: материалы VI международной научно-практической конференции молодых ученых / КрасГАУ. – Красноярск, 2013. – С. 71-72. (0,14).

21. Корпачев, В. П. Влияние структуры и текстуры битого льда на сопротивление движению плота в условиях продленной навигации [Текст] / В. П. Корпачев, А. А. Злобин, Е. М. Максимова // Сборник статей по материалам Всероссийской научно-практической конференции «Лесной и химический комплексы – проблемы и решения». – Красноярск, 2013. – Том 1 – С. 54–56. (0,14/0,07).

22. Злобин, А. А. Анализ взаимодействия плота с кромкой ледяного покрова при движении его в условиях доламывания ледового канала в период продленной навигации [Текст] / А. А. Злобин, Е. М. Максимова, В. П. Корпачев // Сборник статей экологической конференции «Водные ресурсы региона, их охрана и рациональное использование». – Красноярск: СибГТУ, 2013 – С. 54–57. (0,17/0,1).

23. Злобин, А. А. Практическая необходимость проведения транспорта леса в плотях в ранневесенний и позднесенний периоды навигации [Текст] / А. А. Злобин, Е. М. Максимова, В. П. Корпачев // Сборник статей экологической конференции «Водные ресурсы региона, их охрана и рациональное использование». – Красноярск: СибГТУ, 2013 – С. 57–60. (0,3/0,1).

24. Злобин, А. А. Получение аналитических выражений составляющих силы чистого ледового сопротивления движению плота в мелкобитых льдах [Текст] / А. А. Злобин, В. П. Корпачев // Сборник статей экологической конференции «Водные ресурсы региона, их охрана и рациональное использование». – Красноярск: СибГТУ, 2013 – С. 60–63. (0,17/0,1).

Просим принять участие в работе диссертационного совета Д 212.008.01 или прислать Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах с указанием фамилии, имени, отчества, почтового адреса, адреса электронной почты, наименования организации, должности лица, составившего отзыв, подписанные и заверенные печатью, с заверенными подписями по адресу: 163002, г. Архангельск, набережная Северной Двины, 17, САФУ имени М.В. Ломоносова.