

## Технологический процесс производства опилкобетона на основе применения затопленной древесины и отходов лесохимического и целлюлозно-бумажного производств

Н.П. Плотников<sup>а</sup>, И.Н. Челышева<sup>б</sup>

Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия

<sup>а</sup> n-plotnikov@mail.ru, <sup>б</sup> irinachelysheva@yandex.ru

<sup>а</sup> <https://orcid.org/0000-0001-9729-0806>, <sup>б</sup> <https://orcid.org/0000-0003-1017-5149>

Статья поступила 01.09.2025, принята 07.11.2025

*Проблемы утилизации древесины, в больших объёмах оказавшейся под водой в реках и водоёмах Ангаро-Енисейского гидроэнергетического комплекса при создании водохранилищ, а также в процессе транспортировки заготовленного леса, сохраняют свою важность и сегодня, несмотря на то, что с момента затопления прошло более шести десятилетий. Объёмы затопленной древесины увеличиваются за счёт разрушения берегов водохранилищ, вызванного волновым воздействием и изменениями уровня воды. Главная задача исследований – разработка технологического процесса получения древесных композиционных материалов (опилкобетона) на основе применения затопленной древесины и отходов лесохимического и целлюлозно-бумажного производств. В качестве отходов лесохимического и целлюлозного производств был выбран пек талловый неомыленный, растворённый в чёрном сульфатном щелоке. В результате проведённых физико-механических испытаний доказано, что выбранные модифицированные добавки можно применять в производстве композиционного материала – опилкобетона, так как испытания показали хорошие результаты по прочности при сжатии, огнестойкости и теплопроводности. Разработаны математические модели технологии производства опилкобетона на основе использования затопленной древесины сосны и отходов лесохимического и целлюлозного производств, позволяющие адекватно описать предлагаемый технологический процесс. При выбранных интервалах варьирования переменных факторов – содержания количества пека и изменения фракционного состава органического заполнителя наиболее оптимальными являются: фракционный состав опилок – 5/2 и количество содержания пека таллового неомыленного – 5 %. Предложена схема производства опилкобетона по предлагаемой технологии.*

**Ключевые слова:** затопленная древесина; талловый пек; чёрный щелок; опилкобетон; математические модели; физико-механические показатели.

## Technological process for the production of sawdust concrete based on the use of submerged wood and waste from the forestry and pulp and paper industries

N.P. Plotnikov<sup>а</sup>, I.N. Chelysheva<sup>б</sup>

Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

<sup>а</sup> n-plotnikov@mail.ru, <sup>б</sup> irinachelysheva@yandex.ru

<sup>а</sup> <https://orcid.org/0000-0001-9729-0806>, <sup>б</sup> <https://orcid.org/0000-0003-1017-5149>

Received 01.09.2025, accepted 07.11.2025

*The problems of recycling wood that was submerged in large quantities in the rivers and reservoirs of the Angara-Yenisei hydroelectric complex during the construction of reservoirs, as well as during the transportation of harvested timber, remain relevant today, despite the fact that more than six decades have passed since the flooding. The volume of submerged wood is increasing due to the erosion of the reservoir banks caused by wave action and changes in water levels. The main objective of the research is to develop a technological process for producing wood composite materials (sawdust concrete) based on the use of submerged wood and waste from the forestry and pulp and paper industries. As a waste from the forestry and pulp industries, unsaponified tall oil pitch dissolved in black sulfate liquor is chosen. As a result of the conducted physical and mechanical tests, it is proven that the selected modified additives can be used in the production of a composite material – sawdust concrete, as the tests show good results in terms of compressive strength, fire resistance, and thermal conductivity. Mathematical models of the sawdust concrete production technology have been developed based on the use of submerged pine wood and waste from the forestry and pulp industries, which allow for an adequate description of the proposed technological process. At the selected intervals of variation of variable factors – the content of the amount of pitch and the change in the fractional composition of the organic filler, the most optimal are: the fractional composition of sawdust – 5/2 and the amount of content of unsaponified tall oil pitch – 5 %. The scheme of production of sawdust concrete according to the proposed technology is proposed.*

**Keywords:** submerged wood; tall oil pitch; black liquor; sawdust concrete; mathematical models; physical and mechanical properties.

**Введение.** Лесные массивы – это уникальный, самовозобновляющийся природный ресурс, играющий ключевую роль в поддержании экологического баланса и служащий незаменимым источником сырья. В отличие от ископаемых, чьи ресурсы ограничены и не подлежат восстановлению, древесные запасы, при условии рациональной вырубki и грамотного лесопользования, обладают практически неограниченным потенциалом. Россия располагает значительными запасами древесины, оцениваемыми в 80–100 миллиардов кубических метров, что составляет приблизительно 40–50 % от мировых запасов. Однако в процессе заготовки и переработки древесины образуется значительное количество отходов, которые часто используются не в полной мере или вовсе утилизируются. В связи с этим, приоритетной задачей является комплексное использование древесного сырья и эффективная переработка отходов деревообрабатывающей промышленности.

В Восточной Сибири особую актуальность приобретает вопрос переработки брошенной древесины, затопленной в водохранилищах Ангарского каскада ГЭС. Эта древесина, находящаяся под водой или на береговой линии на протяжении десятилетий, включает в себя оставшиеся на корню деревья, спиленные, но не вывезенные хлысты, а также сортименты, попавшие в водоёмы в результате сплава. Наличие затопленной древесины создаёт препятствия для судоходства и негативно влияет на экологическое состояние рек и водохранилищ [1–8].

Согласно исследованиям, проведённым различными учеными [1–8], объём затопленной древесины в Ангаро-Енисейском каскаде может достигать 24,69 млн м<sup>3</sup>, в том числе в Братском водохранилище – от 5,0 до 12,0 млн м<sup>3</sup>. Особый интерес для научного сообщества представляет возможность использования топлива для сокращения объёмов вырубки лесов и улучшения экологической обстановки в водоёмах.

В условиях целлюлозно-бумажного производства по сульфатному способу Усть-Илимского ЛПК группы «Илим» образуется огромное количество отходов и побочных продуктов, не находящихся дальнейшего применения. К таким видам отходов относятся: талловый пек и чёрный щелок.

Цель исследований – разработка технологического процесса получения древесных композиционных материалов (опилкобетона) на основе применения затопленной древесины и отходов лесохимического и целлюлозно-бумажного производств.

**Методика исследований.** В рамках данной работы материалом для изучения послужила древесина сосны, извлечённая из Братского водохранилища после длительного нахождения под водой. Для анализа физико-механических свойств использовались стандартные методы, широко применяемые в исследованиях древесины [13–23].

Предварительно извлечённые со дна водоёма образцы древесины были подвергнуты естественной сушке в условиях, обеспечивающих хорошую циркуляцию воздуха и защиту от прямых солнечных лучей. После этого из высушенных стволов были вырезаны необходимые фрагменты, которые впоследствии были измельчены с помощью молотковой дробилки для полу-

чения опилок из затопленной древесины. В ходе работы выбрана одна из техник изготовления опилкобетона марки М5. Приготовление рабочей смеси происходит следующим образом: в равных долях смешиваются цемент и известь-пушонка, затем добавляются опилки (из расчета три части опилок к одной части цемента). Все перемешивается, потом мелкими порциями добавляется вода до получения однородной массы согласно ГОСТ 19222-2019 [24]. Затем в некоторые образцы, непрерывно помешивая приготовленную смесь, добавляем пек талловый неомыленный, растворённый в нагретом сульфатном чёрном щелоке. Также изменяем фракционный состав заполнителя.

Талловый пек и сульфатный щелок были представлены филиалами АО «Группа «Илим» в г. Братске и г. Усть-Илимске, цехами ректификации таллового масла и очистки скипидара и разложения сульфатного мыла.

Для апробации смеси были изготовлены опытные образцы, для чего использовались спаренные металлические контейнеры и деревянные размерные шаблоны (формы) размером полости 50 × 50 × 50 мм. Каждый образец был помещен в полиэтиленовый пакет. Через некоторое время образцы были извлечены из форм и полиэтилена и оставлены на вызревание в нормальных условиях (температура воздуха 20–25 °С, естественная вентиляция воздуха).

Высушенные образцы подвергались испытаниям с определением выходных показателей.

Предварительно составленная матрица планирования позволила произвести расчёты и реализовать двухфакторный основной эксперимент по В-плану второго порядка.

Определение плотности, влажности, водопоглощения, объёмного набухания, сорбционного увлажнения, предела прочности на сжатие полученных образцов опилкобетона на основе затопленной древесины и отходов лесохимического и целлюлозного производств производилось в соответствии с общепринятыми методиками и согласно требованиям ГОСТ 19222-2019.

Определение огнестойкости полученных образцов происходило по методу огневой трубы.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Формирование оптимальной структуры бетона, позволяющей существенно повысить его долговечность и улучшить физико-механические свойства, во многих случаях обеспечено добавлением химических добавок.

В регионах Восточной Сибири и северных областях России востребованные присадки, способствующие быстрому затвердеванию (такие как хлорид кальция, нитрат кальция, нитрит, сульфат алюминия, оксид кальция), а также составы, образующие защитную оболочку на поверхности заполнителя (например, раствор силиката натрия, смесь раствора силиката натрия и хлорида кальция, смесь раствора силиката натрия и сульфата алюминия, смесь раствора силиката натрия и фурфуролового спирта), характеризуются ограниченной доступностью, поставляются из отдалённых местностей и часто содержат в своём составе значительное количество воды (от 50 до 70 %), что создаёт проблемы при их перевозке и хранении, особенно в зимнее время года.

Вместе с этим, при сульфатном методе переработки древесины, который широко распространён в данных

районах, из промежуточных продуктов и отходов производства целлюлозы – кормовых дрожжей, скипидара, талловых масел и канифоли – можно получить практически весь комплекс химических добавок в древесные композиционные материалы и строительные растворы, что позволяет им твердеть при отрицательных температурах и приводит к быстрому схватыванию смесей.

Продуктами, нашедшими своё применение в композиционных материалах без предварительной подготовки, являются чёрный сульфатный щелок, мыло сырое сульфатное и пек талловый омыленный.

Основная функция клея, созданного на основе таллового пека, заключается в его использовании для создания клей-пасты, применяемой для склеивания картона и сортов бумаги невысокого качества. Его получают на заводах побочных продуктов лесопромышленных комплексов омылением таллового пека. Неиспользуемые излишки таллового пека сжигаются.

Талловый пек является кубовым остатком при ректификации сырого таллового масла и представляет собой сложную по компонентному составу смесь продуктов этерификации гидроксидсодержащих соединений таллового масла (стерины, фенолы, спирты жирного ряда, спирты смоляные) смоляными и жирными кислотами, а также продуктами полимеризации ненасыщенных жирных кислот. Некоторые характеристики пека приведены в табл. 1.

**Таблица 1.** Характеристика таллового пека

Наименование	Содержание, %
Вода	до 0,2
Минеральные вещества	до 3,5
Групповой состав:	
жирные кислоты	28
смоляные кислоты	21
окислительные вещества	28
нейтральные вещества	23
Элементный состав:	
углерод	79–80
водород	10–11
зола	3,0–3,5
кислород	остальное

Применение чёрного сульфатного щелока как химической добавки в производстве древесных композиционных материалов предназначено для получения последних высокой морозостойкости. В отработанном щелочном растворе после варки целлюлозы присутствует разнородный набор неорганических и органических соединений. Основным компонентом является глюкоизосахаринат, однако, кроме него, в значительном объёме присутствуют побочные продукты щелочной варки: этановая, метановая, 2-гидроксипропановая, гидроксиуксусная, ксилоизосахариновая и другие карбоновые кислоты. Процентное соотношение различных органических кислот в чёрном щелоке, полученном в процессе сульфатной варки, отражено в табл. 2.

Чёрный щелок, образующийся в процессе сульфатной варки лиственной древесины, характеризуется несколько отличным компонентным составом. В нём отмечается присутствие существенной доли натриевых солей летучих органических кислот, достигающей 10–12 % от общей массы сухого остатка чёрного щелока.

**Таблица 2.** Массовое содержание кислот в чёрном щелоке после сульфатной варки древесины

Наименование кислот	Содержание, %
муравьиная	16
уксусная	11
гликолевая	3
молочная	11
2-оксиконифериловая	4,2
5-диоксивалериановая	3
ксилоизосахариновая	4
$\alpha$ -глюкоизосахариновая	26
$\beta$ -глюкоизосахариновая	26
прочие кислоты	11

Данный факт обусловлен повышенным содержанием ацетильных групп в лиственной древесине. Эти группы, преимущественно входящие в структуру гемицеллюлоз, в ходе варки отщепляются, формируя летучие органические кислоты. Таким образом, специфика состава лиственной древесины напрямую влияет на состав и свойства производимого чёрного щелока.

Благодаря пластифицирующему действию черного сульфатного щелока снижается водосодержание смеси на 10–15 %. Это способствует увеличению прочности и снижению водопоглощения полученных материалов.

В качестве выходных величин были приняты качественные показатели готовой продукции (тепло-изоляционного опилкобетона марки М5):

$Y_1$  – средняя плотность,  $\rho_{\text{ср}}$ , кг/м<sup>3</sup>;  
 $Y_2$  – влажность,  $W$ , %;  
 $Y_3$  – предел прочности при сжатии,  $\sigma_{\text{сж}}$ , МПа;  
 $Y_4$  – водопоглощение,  $A$ , %;  
 $Y_5$  – потеря массы в процессе огневых испытаний,  $P$ , %;

$Y_6$  – объёмное набухание,  $H$ , %;  
 $Y_7$  – сорбционное увлажнение,  $C$ , %;  
Варьируемые факторы эксперимента:  
 $X_1$  – количество вводимого пека в составе композиции, %;

$X_2$  – фракционный состав опилок.

При определении диапазона изменения параметров следует учитывать ряд важных моментов:

– диапазон вариации должен превышать удвоенную квадратичную погрешность установления данного фактора. Иными словами, он не должен быть меньше, чем ошибка, с которой определяются значения факторов, иначе максимальный и минимальный уровни станут неразличимы;

– диапазон вариации не должен быть настолько широким, чтобы крайние значения выходили за границы изучаемой области.

Основываясь на этих требованиях, диапазон изменения переменных факторов будет установлен на уровне 5 %. В табл. 3 представлены натуральные и кодированные значения варьируемых факторов, а также их уровни и диапазоны вариации, использованные при проведении двухфакторного эксперимента.

Таблица 3. Основные факторы и уровни их варьирования

Наименование фактора	Обозначение	Нижний уровень	Основной уровень	Верхний уровень	Интервал варьирования
количество вводимого пека в составе композиции, %	$X_1$	0	5	10	5
фракционный состав опилок	$X_2$	10/5	5/2	2/0,5	–

В ходе эксперимента соблюдались следующие постоянные условия: температура окружающей среды поддерживалась на уровне  $23 \pm 1^\circ\text{C}$ , относительная влажность воздуха составляла  $45 \pm 5\%$ , в качестве основного компонента использовались хвойные опилки из древесины, находившейся под водой, их влажность была зафиксирована на отметке  $6,0 \pm 0,1\%$ . Все образцы имели идентичные размеры –  $50 \times 50 \times 50$  мм. На каждый кубический метр смеси расходовалось 24,0 кг извести-пушонки, 200 л воды и 24,0 кг цемента.

Основное внимание уделялось изучению влияния различных пропорций пека в составе опилкобетонной смеси, а также фракционного состава сырья, на значения физико-механических показателей марки М5, регламентированных ГОСТ 19222.

Целью данного эксперимента являлось построение эмпирической математической модели исследуемого объекта, то есть установление зависимости между выходными параметрами и изменяемыми факторами.

Изготовление образцов и анализ их физико-механических свойств проводились в лабораторных условиях на базе кафедры воспроизводства и переработки лесных ресурсов ФГБОУ ВО «Братский государственный

университет». В рамках исследования был реализован двухфакторный эксперимент.

Для создания математической модели процесса с количественными факторами, подтверждения её точности и оценки степени влияния каждого изменяемого фактора, применялся регрессионный анализ.

Для получения регрессионных уравнений был использован композиционный В-план второго порядка.

На следующем этапе был проведён многофакторный эксперимент для получения адекватного математического описания технологического процесса производства опилкобетона предложенного состава.

Полученные значения выходных параметров совместно с матрицей планирования эксперимента по В-композиционному плану второго порядка, представленные в нормализованном и натуральном виде варьируемых факторов, сведены в табл. 4.

В общем случае, при количестве изменяемых факторов, равном  $k$ , математическая модель для изучаемого выходного параметра  $Y$  принимает следующий вид:

$$Y = B_0 + \sum_{i=1}^k B_i X_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i < j}}^k B_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^k B_{ii} X_i^2$$

Таблица 4. Результаты двухфакторного эксперимента

Номер опыта	$x_1$	$x_2$	$X_1, \%$	$X_2,$	$Y_1, \rho, \text{кг/м}^3$	$Y_2, W, \%$	$Y_3, \sigma_{сж}, \text{МПа}$	$Y_4, A, \%$	$Y_5, P, \%$	$Y_6, H, \%$
1	–1	–1	0	10/5	446,8	15,7	2,7	103	4,1	3,5
2	+1	–1	10	10/5	486,9	5,6	2,3	125	3,9	3,05
3	–1	+1	0	2/0,5	412,5	13	0,8	88	5,9	6,9
4	+1	+1	0	2/0,5	513,0	11	0,85	108	5,7	3,2
5	–1	0	0	5/2	428,0	13,9	1,5	52	7,7	4,3
6	+1	0	10	5/2	529,5	8,7	2,6	86	4,2	5,5
7	0	–1	5	10/5	417,6	9,2	2,9	122	5,9	2,9
8	0	+1	5	2/0,5	447,0	9,9	0,5	103	5,6	5,9

Математическая модель, отражающая связь между регламентированными ГОСТ 19222 физико-механическими характеристиками опилкобетона и изменяемыми технологическими факторами, представлена в форме нормализованного регрессионного уравнения:

– предел прочности при сжатии, ( $Y_3, \sigma_{сж}$ ), МПа:

$$Y_1 = 2,08 + 0,24x_1 - 0,96x_2 - 0,03x_1^2 - 0,385x_2^2 + 0,11x_1x_2$$

Математическая модель, отражающая связь между регламентированными ГОСТ 19222 физико-механическими характеристиками опилкобетона и изменяемыми технологическими факторами, представлена в форме нормализованного регрессионного уравнения:

– водопоглощение, ( $Y_4, A$ ), %:

$$Y_4 = 75,52 + 12,67x_1 + 2,17x_2 - 6,5x_1^2 + 37x_2^2 - 0,5x_1x_2$$

Математическая модель, отражающая связь между регламентированными ГОСТ 19222 физико-механическими характеристиками опилкобетона и изменяемыми технологическими факторами, представлена в форме нормализованного регрессионного уравнения:

– потеря массы в процессе огневых испытаний, ( $Y_5, P$ ), %:

$$Y_3 = 6,8 - 0,65x_1 + 0,55x_2 - 0,85x_1^2 - 1,05x_2^2$$

Математическая модель, отражающая связь между регламентированными ГОСТ 19222 физико-механическими характеристиками опилкобетона и изменяемыми технологическими факторами, представлена в форме нормализованного регрессионного уравнения:

– объёмное набухание, ( $Y_6$ , Н), %:

$$Y_6 = 5,14 - 0,49x_1 + 1,1x_2 - 0,24x_1^2 - 0,74x_2^2 - 0,81x_1x_2$$

В результате оценки значимости каждого коэффициента регрессии, входящего в уравнения функций отклика, уравнения обретут окончательный вид:

– предел прочности при сжатии, ( $Y_3$ ,  $\sigma_{сж}$ ), МПа

$$Y_3 = 2,08 + 0,24x_1 - 0,96x_2 - 0,385x_1^2 + 0,11x_1x_2$$

– водопоглощение, ( $Y_4$ , А), %:

$$Y_4 = 75,52 + 12,67x_1 + 2,17x_2 - 6,5x_1^2 + 37x_2^2$$

– потеря массы в процессе огневых испытаний, ( $Y_5$ , Р), %:

$$Y_5 = 6,8 - 0,65x_1 + 0,55x_2 - 0,85x_1^2 - 1,05x_2^2$$

– объёмное набухание, ( $Y_6$ , Н), %:

$$Y_6 = 5,14 - 0,49x_1 + 1,1x_2 - 0,24x_1^2 - 0,74x_2^2 - 0,81x_1x_2$$

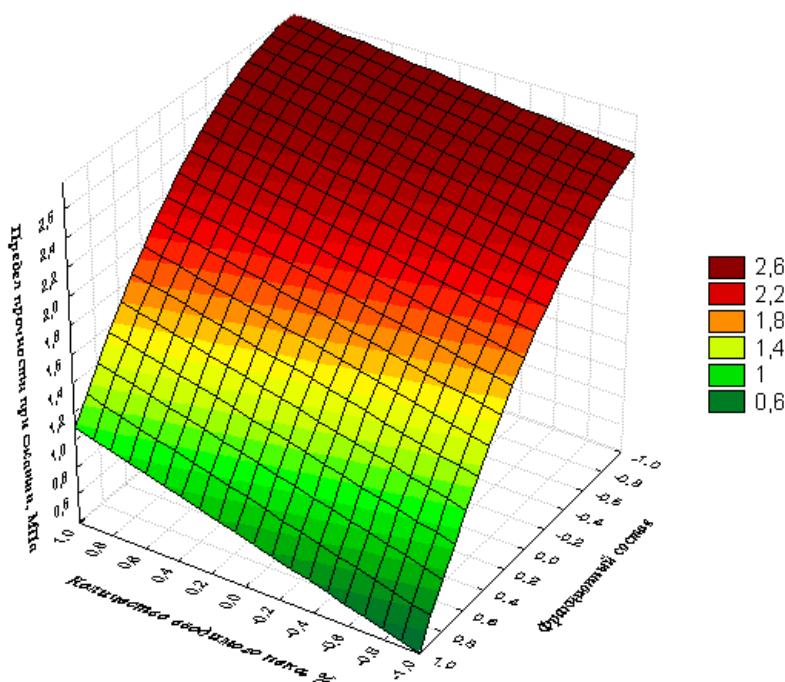
Проверка адекватности полученных уравнений регрессии производится по критерию Фишера.

В табл. 5 представлены итоги анализа адекватности разработанных математических моделей.

Опираясь на найденные уравнения регрессии, были созданы графические отображения. На рис. 1 изображена поверхность отклика, отражающая взаимосвязь между пределом прочности при сжатии опилкобетона, концентрацией добавляемого пека в смесь и фракционным распределением исходного материала.

**Таблица 5.** Проверка адекватности математических моделей

Величина	Обозначение параметров				Вывод
	$S_{ad}^2$	$S^2\{y\}$	$F_{расч}$	$F_{табл}$	
Предел прочности при сжатии, $\sigma_{сж}$ , МПа	513,45	89,48	5,738	5,79	Модель адекватна
Водопоглощение, А, %	21,38	9,45	2,262	5,79	Модель адекватна
Потеря массы в процессе огневых испытаний, Р, %	1,85	1,12	1,651	5,79	Модель адекватна
Объёмное набухание, Н, %	4,16	1,26	3,302	5,79	Модель адекватна

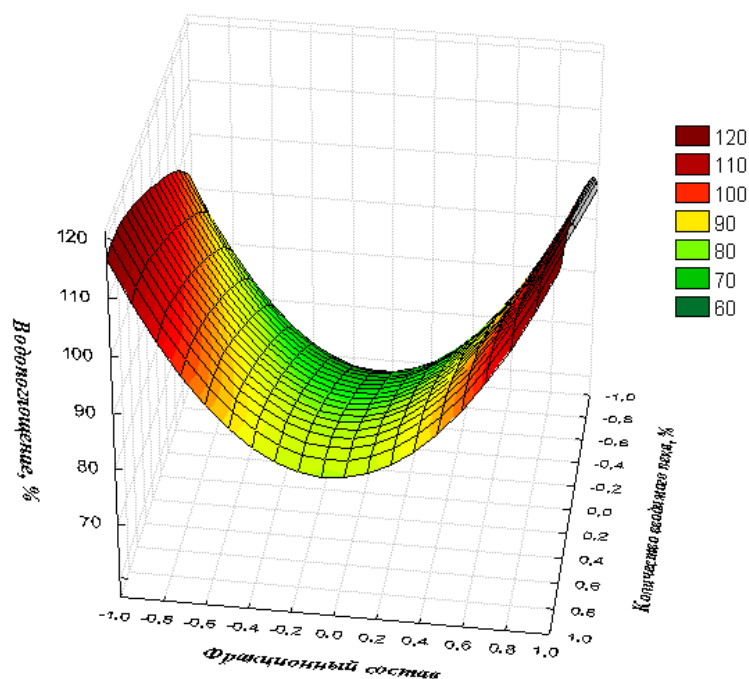


**Рис. 1.** График зависимости предела прочности при сжатии опилкобетона от количества вводимого пека в составе композиции и фракционного состава сырья

Самое низкое зафиксированное значение прочности для предложенной рецептуры опилкобетона, составляющее 0,5 МПа, было отмечено при содержании пека в 5 % и фракционном составе сырья 2/0,5. Наивысший предел прочности на сжатие опилкобетона, достигающий 2,9 МПа, наблюдается при анало-

гичном содержании пека (5 %), но при фракционном составе сырья 10/5.

Зависимость водопоглощения опилкобетона от процентного содержания пека в композиции и фракционного состава исходных материалов визуализирована на графике, представленном на рис. 2.

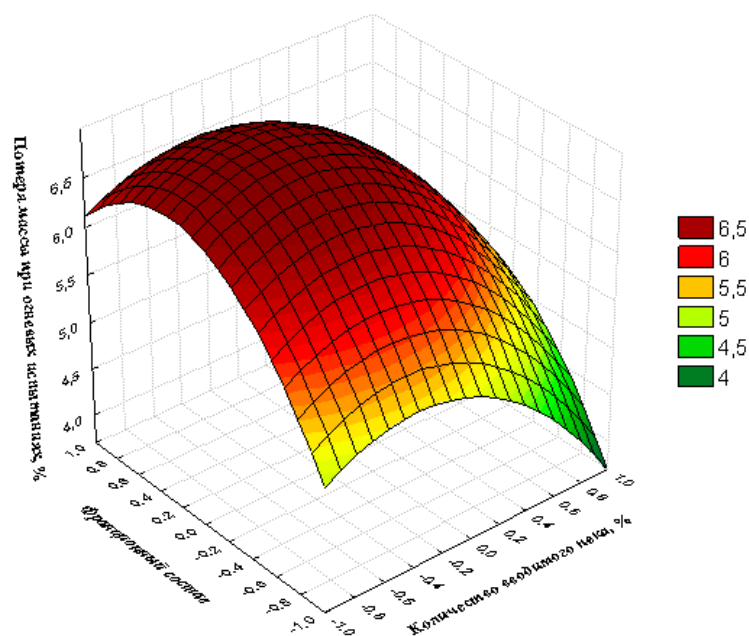


**Рис. 2.** График зависимости водопоглощения опилкобетона от количества вводимого пека в составе композиции и фракционного состава сырья

Наименьшее водопоглощение у предложенного опилкобетона, составляющее 52 %, отмечено при отсутствии пека в составе смеси и фракционном составе сырья 5/2. Наибольшее водопоглощение опилкобетона, достигающее 125 %, зафиксировано при содержании

пека на уровне 10 % от состава композиции и фракционным составом сырья 10/5.

График зависимости потери массы опилкобетона в процессе огневых испытаний от количества вводимого пека в составе композиции и фракционного состава сырья представлен на рис. 3.

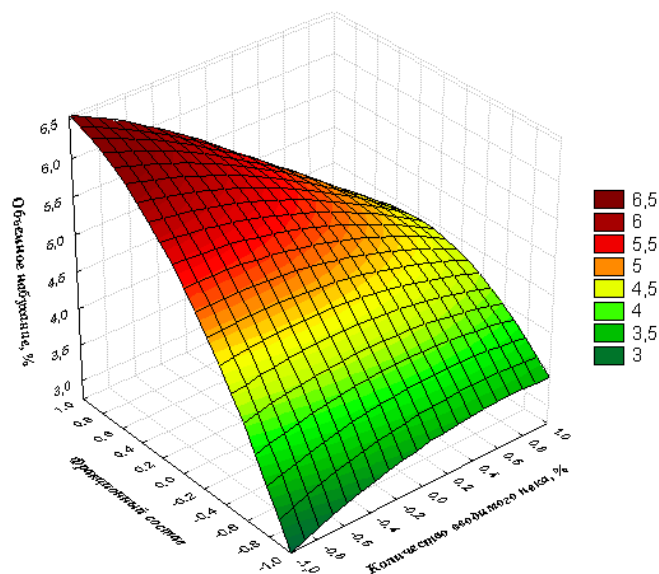


**Рис. 3.** График зависимости потери массы опилкобетона в процессе огневых испытаний от количества вводимого пека в составе композиции и фракционного состава сырья

Наименьшая потеря массы опилкобетона при огневых испытаниях, зафиксированная на уровне 3,9 %, была отмечена для образца с 10 % добавлением пека и фракционным составом сырья 10/5. Наибольшая потеря массы, достигающая 7,7 %, наблюдалась в образ-

це, где пек отсутствовал, а фракционный состав сырья составлял 5/2.

На рис. 4 отображена зависимость объёмного набухания опилкобетона от процентного содержания пека в составе и фракционного распределения частиц сырья.

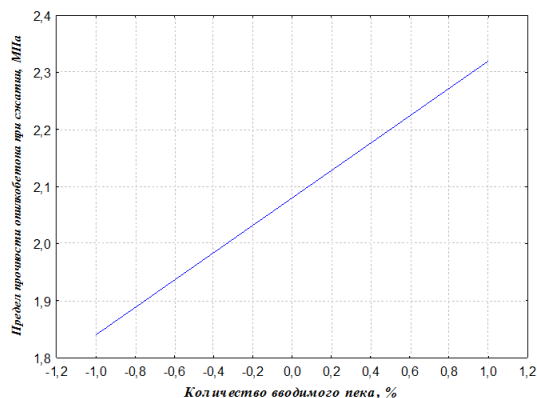


**Рис. 4.** График зависимости объёмного набухания опилкобетона от количества вводимого пика в составе композиции и фракционного состава сырья

Минимальное значение объёмного набухания опилкобетона, равное 2,9 %, было зафиксировано при добавлении 5 % пика и использовании фракции сырья размером 10/5. Наибольшее объёмное расширение опилкобетона, достигающее 6,9 %, наблюдалось в ситуации, когда пек не добавлялся вовсе, а фракция сырья была 2/0,5.

На основе полученных математических выражений были построены графики, отражающие влияние отдельных факторов.

На рис. 5 продемонстрирована кривая, показывающая, как меняется предел прочности на сжатие опилкобетона в зависимости от количества добавляемого пика, при этом фракционный состав сырья поддерживается на уровне 5/2.

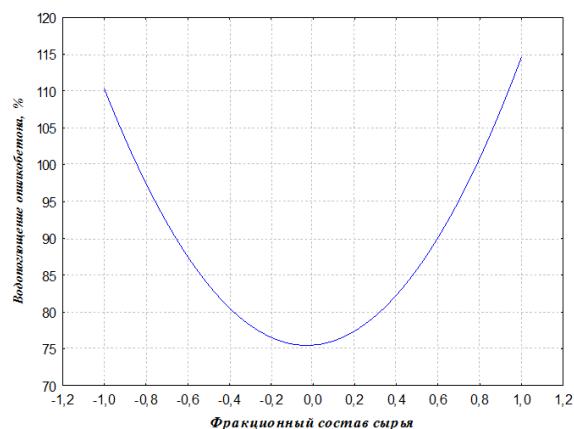


**Рис. 5.** График зависимости предела прочности при сжатии опилкобетона от количества вводимого пика в составе композиции при фракционном составе сырья – 5/2

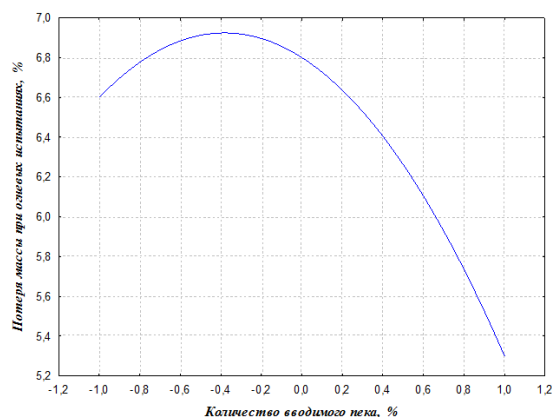
График зависимости водопоглощения опилкобетона от фракционного состава сырья при количестве вводимого пика в состав композиции – 5 % представлен на рис. 6.

Минимальное значение водопоглощения опилкобетона наблюдается при фракционном составе сырья 5/2, при этом количество вводимого пика в состав композиции 5 %.

График зависимости потери массы опилкобетона в процессе огневых испытаний от количества вводимого пика в составе композиции при фракционном составе сырья – 5/2 представлен на рис. 7.



**Рис. 6.** График зависимости водопоглощения опилкобетона от фракционного состава сырья при количестве вводимого пика в состав композиции, равном 5 %



**Рис. 7.** График зависимости потери массы опилкобетона в процессе огневых испытаний от количества вводимого пика в составе композиции при фракционном составе сырья – 5/2.



Наибольшая потеря массы опилкобетона при воздействии огня фиксируется, если содержание добавляемого пека не превышает 2,5 % от общей массы композиции, при фракционном составе сырья 5/2.

Наименьшая потеря массы опилкобетона в условиях огневого воздействия отмечена при использовании 10 % пека в составе смеси, при условии сохранения фракционного состава сырья на уровне 5/2.

График зависимости объёмного набухания опилкобетона от фракционного состава сырья при количестве вводимого пека в состав композиции – 5 % представлен на рис. 8.

Минимальное значение объёмного набухания опилкобетона наблюдается при фракционном составе сырья 10/5, при этом количество вводимого пека в состав композиции 5 %.

На основании проведённого анализа существующих технологических схем производства опилкобетона была предложена схема технологического процесса про-

изводства предлагаемого состава опилкобетона, представленная на рис. 9.

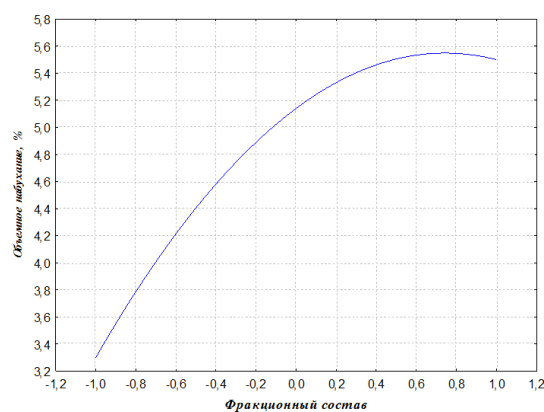


Рис. 8. График зависимости объёмного набухания опилкобетона от фракционного состава сырья при количестве вводимого пека в состав композиции – 5 %

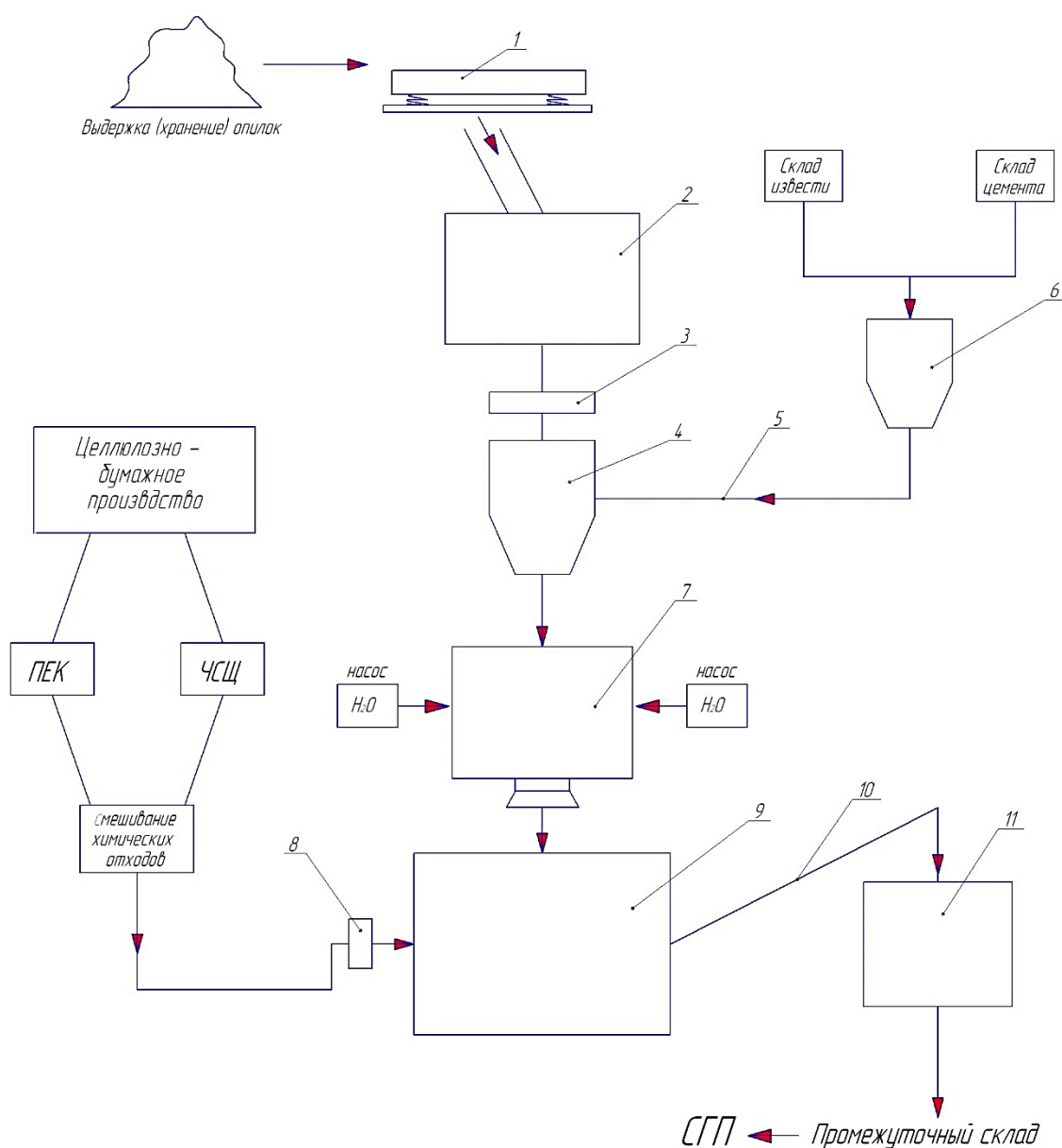


Рис. 9. Предлагаемая схема технологического процесса производства опилкобетона, планируемого к выпуску



Перечень основного технологического оборудования для приведённой выше технологической схемы производства опилкобетона представлен в табл. 6.

**Таблица 6.** Перечень основного технологического оборудования для производства предлагаемого состава опилкобетона

Позиция	Наименование
1	Вибрационный станок с ситами
2	Бункер для заполнителя (приемный)
3	Дозатор опилок
4	Бункер для заполнителя и минеральных добавок
5	Конвейер
6	Смеситель
7	Бетоносмеситель
8	Дозатор химических добавок
9	Смеситель для приготовления смеси опилкобетона
10	Конвейер винтовой
11	Установка формования

Сырьё для производства (опилки) выдерживается на открытом воздухе в течение 2–4 месяцев. После выдержки заполнитель проходит через вибрационный станок с установленными на нём ситами с заданными размерами ячеек для отделения опилок от земли, кусочков коры, металлических и других сторонних веществ.

Затем опилки через дозатор попадают в смеситель, где перемешиваются с минеральным вяжущим и добавкой (цементом и известью).

Следующим шагом будет добавление воды к сухой перемешанной смеси. Далее по транспортёрной ленте уже готовая сырьевая композиция опилкобетона смешивается с модификатором: неомыленным талловым пеком, растворённым в чёрном сульфатном щелоке. Дозирование отходов сульфатно-целлюлозного производства происходит через дозаторы.

Качественно перемешанный состав композита поступает на участок формования. Небольшими пор-

циями его помещают в подготовленные металлические формы и формуют с применением виброукладчика.

Заполненные формы поступают на буферный склад – технологическую выдержку. Для обеспечения требуемых условий образования цементного камня, их накрывают полиэтиленовой пленкой и оставляют в помещении на несколько дней для начального набора прочности (через 3–4 дня обеспечивается 30 % от требуемой прочности, через 5–12 дней – 70 %).

Затем происходит распалубка блоков опилкобетона и выдержка в сухом помещении с нормальной влажностью. Марочную прочность опилкобетон набирает спустя 3 месяца. После чего готовые блоки опилкобетона упаковываются и отправляются потребителю.

**Заключение.** По результатам исследований получения древесного композиционного материала (опилкобетона) на основе использования затопленной древесины сосны и отходов лесохимического и целлюлозного производств установлено:

1. В качестве отходов лесохимического и целлюлозного производств был выбран пек талловый неомыленный, растворённый в чёрном сульфатном щелоке.

2. В результате проведённых физико-механических испытаний доказано, что выбранные модифицированные добавки можно применять в производстве композиционного материала – опилкобетона, так как испытания показали хорошие результаты по прочности при сжатии, огнестойкости и теплопроводности.

3. Разработаны математические модели технологии производства опилкобетона на основе использования затопленной древесины сосны и отходов лесохимического и целлюлозного производств, позволяющие адекватно описать предлагаемый технологический процесс.

4. При выбранных интервалах варьирования переменных факторов – содержание количества пека и изменение фракционного состава органического заполнителя наиболее оптимальными являются: фракционный состав опилок – 5/2 и количество содержания пека таллового неомыленного – 5 %.

5. Предложена схема производства опилкобетона по предлагаемой технологии.

#### Литература

- Корпачев В.П., Пережилин А.И., Андрияс А.А., Рябонь Ю.И. Загрязнение и засорение водохранилищ ГЭС древесно-кустарниковой растительностью, органическими веществами и влияние их на качество воды : монография. Пенза : Изд-во «Академия Естествознания», 2010. 127 с.
- Жук А.Е. Техническое обеспечение сплава древесины, утратившей плавучесть // Системы. Методы. Технологии. 2011. № 2 (10). С. 135–139.
- Корпачев В.П. Оценка степени влияния затопленной и плавающей древесной массы в ложе водохранилищ ГЭС Сибири на качество вод // Междунар. школа-конф. «Социально-экологические проблемы природопользования в Центральной Сибири» : сб. мат.-лов. [Электронный ресурс]. [http://conf.sfu-kras.ru/conf/ecoproblem/report?memb\\_id=708](http://conf.sfu-kras.ru/conf/ecoproblem/report?memb_id=708) (дата обращения: 22.06.2025 г.)
- Корпачев В.П., Пережилин А.И., Андрияс А.А., Карев Д.В. Технологии и технические средства очистки водохранилищ ГЭС от плавающей древесины // Хвойные борельной зоны. 2018. № 3. [Электронный ресурс] <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologii-i-tehnicheskie-sredstva-ochistki-vodohranilisch-ges-ot-plavayuschey-drevesiny> (дата обращения 17.04.2025).
- Корпачев В.П. Методика прогнозирования поступления древесной массы в водохранилища ГЭС Сибири // Лесное хозяйство. 2004. № 6. С. 21–23.
- Трофимук В.Н., Седрицев Д.Н. Освоение древесины в полосе размывания берегов водохранилищ Ангара-Енисейского региона // Современные наукоемкие технологии. 2006. № 7. С. 98–99.
- Корпачев В.П., Малинин Л.И., Чебых М.М. Методика прогнозирования поступления древесной массы при затоплении и эксплуатации водохранилищ Ангара-Енисейского региона // Сб. науч. тр. Всесоюз. науч.-проектной конф. «Использование и восстановление ресурсов Ангара-Енисейского региона. Т. 2. Красноярск-Лесосибирск : Изд-во СибГТУ, 1991. С. 107–117.
- Угрюмов Б.И., Новоселов А.В., Иванов В.А. и др. Проблемы организации технологических процессов освоения «бесхозной» аварийной древесины : учеб. пособие. Братск : Изд-во Братск. индустриал. ин-та, 1998. 84 с.

9. Ушаков А.С. О некоторых свойствах затопленной древесины // Водные ресурсы региона, их охрана и рациональное использование: сб. статей 10-й экологической конференции студентов, магистрантов и аспирантов, Красноярск, 24 ноября 2014 г. Красноярск : Изд-во Сиб. гос. технологич. ун-та, 2014. С. 61–65.
10. Губин И.В. Исследование физико-механических свойств топяковой древесины // Мат-лы III Междунар. науч.-практич. конф. «Дни науки-2007». Технические науки. Строительство и архитектура. Т. 11. Днепропетровск: Наука и образование, 2007. С. 15–17.
11. Аксенов П.А., Рунова Е.М., Плотников Н.П. Исследование макро- и микростроения затопленной древесины ели // Хвойные бореальной зоны. 2023. № 41(4). С. 339–345. DOI: 10.53374/1993-0135-2023-4-339-345
12. Ушаков А.С. О некоторых свойствах затопленной древесины // Водные ресурсы региона, их охрана и рациональное использование : сб. статей 10-й экологической конф. студентов, магистрантов и аспирантов (24 нояб. 2014 г.). Красноярск : Изд-во Сиб. гос. технологич. ун-та, 2014. С. 61–65.
13. Рунова Е.М., Плотников Н.П., Челышева И.Н., Медведева П.С. Физико-механические свойства затопленной древесины ели сибирской и перспективы её использования // Системы. Методы. Технологии. 2023. № 4 (60). С. 101–105.
14. Полубояринов О.И. Плотность древесины. М. : Лесная промышленность, 1976. 160 с.
15. Пауль Э.Э. Зависимость механических свойств древесины от её плотности // Лесное и охотничье хозяйство. 2011. № 10. С. 20–23.
16. ГОСТ 16483.1–84. Древесина. Метод определения плотности. М. : Изд-во стандартов, 1999. 5 с.
17. ГОСТ 16483.35–88. Взамен 16483.35–80. Древесина. Метод определения разбухания. Введ. с 01.01.90 по 01.01.95. М. : Изд-во стандартов, 1999. 5 с.
18. ГОСТ 16483.3–84. Древесина. Метод определения предела прочности при статическом изгибе. М. : Изд-во стандартов, 1999. 6 с.
19. ГОСТ 16483.5–73. Древесина. Методы определения предела прочности при скалывании вдоль волокон М. : Изд-во стандартов, 1999. 6 с.
20. ГОСТ 16483.17–81. Древесина. Метод определения статической твердости. М. : Изд-во стандартов, 1999. 5 с.
21. ГОСТ 16483.0–89. Древесина. Общие требования к физико-механическим испытаниям. М. : Изд-во стандартов, 1999. – 10 с.
22. ГСССД 69-84. Древесина. Показатели физико-механических свойств малых чистых образцов. М. : Изд-во стандартов, 1985. 29 с.
23. Боровиков А.М., Уголев Б.Н. Справочник по древесине. М. : Лесная промышленность, 1989. 296 с.
24. ГОСТ 19222–2019. Арболит и изделия из него. Общие технические условия. М. : Стандартинформ, 2019. 36 с.
25. "Central Siberia", collection of materials [Electronic resource]. – Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2008. — Access mode: <http://conf.sfu-kras.ru/conf/ecoproblem/report?membid=708>, free. (date of reference: 04/22/2025)
4. Korpachev V.P., Perestilin A.I., Andrias A.A., Karev D.V. Technologies and technical means of cleaning hydroelectric power plant reservoirs from floating wood // KHBZ. 2018. № 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologii-i-tehnicheskie-sredstva-ochistki-vodohranilishego-ot-plavayuschey-drevesiny> (date of reference: 04/17/2025).
5. Korpachev V.P. Methodology for predicting the flow of wood pulp into hydroelectric power plant reservoirs Siberia / V.P. Korpachev // Forestry. – 2004. – No. 6. – pp. 21–23.
6. Trofimuk V.N., Sedrisev D.N. Development of timber in the erosion zone of the shores of reservoirs of the Angara–Yenisei region // Modern high-tech technologies. 2006. No. 7. Pp. 98–99; URL: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=23034> (date of request: 04/17/2025).
7. Korpachev B.P., Malinin L.I., Chebykh M.M. Methodology for predicting wood pulp intake during flooding and operation of reservoirs in the Angara–Yenisei region // Collection of scientific papers. All-Union Scientific Design Conference. "Using and restoring the resources of the Angara–Yenisei region". Volume 2 – Krasnoyarsk, Lesosibirsk: Publishing house of SibSTU, 1991 p. 107–117
8. Ugryumov B.I., Novoselov A.V., Ivanov V.A. and others. Problems of the organization of technological processes for the development of «orphan» emergency wood: A textbook. Bratsk : BRII, 1998. 84 с.
9. Ushakov A.S. On some properties of flooded wood / A.S. Ushakov // Water resources of the region, their protection and rational use: collection of articles of the 10th Ecological Conference of students, undergraduates and postgraduates, Krasnoyarsk, November 24, 2014. Krasnoyarsk: Siberian State Technological University, 2014. pp. 61–65. – EDN ZCNLZR.
10. Gubin I.V. Investigation of physico-mechanical properties of poplar wood / I.V. Gubin, E.A. Gudaeva // Proceedings of the III International Scientific and practical Conference "Days of Science–2007". Technical sciences. Construction and architecture. Dnepropetrovsk: Science and Education, 2007. Volume 11. pp. 15–17.
11. Aksenov P.A., Runova E.M., Plotnikov N.P. Investigation of macro and microstructure of flooded spruce wood. //Conifers of the boreal zone. 2023; 41(4):339–345. <https://doi.org/10.53374/1993-0135-2023-4-339-345>
12. Ushakov A.S. On some properties of flooded wood // Water resources of the region, their protection and rational use: collection of articles of the 10th Ecological Conference of students, undergraduates and postgraduates (November 24, 2014). Krasnoyarsk: Siberian State University of Technology, 2014. pp. 61–65.
13. Runova E.M., Plotnikov N.P., Chelysheva I.N., Medvedeva P.S. Physico-mechanical properties of flooded Siberian spruce wood and prospects for its use// Systems, Methods, And Technologies. 2023. No. 4 (60) pp. 101–105.
14. Poluboyarinov O.I. Wood density / O.I. Poluboyarinov. M. : Lesnaya promst, 1976. – 160 p.
15. Paul, E.E. Dependence of mechanical properties of wood on its density / E. E. Paul, V. N. Kukhta // Forestry and Hunting, 2011– No. 10– pp. 20–23.
16. Wood. Density determination method: GOST 16483.1–84. M. : Publishing House of Standards, 1999. 5 p.
17. Wood. Method for determining swelling: GOST 16483.35–88. Instead of 16483.35–80; Introduced from 01.01.90 to 01.01.95. Moscow: Publishing House of Standards, 1999. 5 p.
18. Wood. Method for determining the ultimate strength under static bending: GOST 16483.3–84. M. : Publishing House of Standards, 1999. 6 p.

#### References

1. Korpachev V.P., Perestilin A.I., Andrias A.A., Ryabokon Yu.I. Pollution and clogging of hydroelectric power plant reservoirs with woody and shrubby vegetation, organic substances and their effect on water quality: monograph / – Publishing House "Academy of Natural Sciences", 2010. 127 p.
2. Zhuk, A. E. Technical support for the alloy of wood that has lost its buoyancy / A.E. Zhuk // Systems. Methods. Technologies. – 2011. – № 2 (10). – Pp. 135–139.
3. Korpachev V.P., Malinin L.I., Sladikova S.M., Ryabokon Yu.I., Perestilin A.I. Assessment of the degree of influence of flooded and floating wood pulp in the reservoir of Siberian hydroelectric power plants on water quality. // International school-conference "Socio-ecological problems of nature use in Cen-

19. Wood. Methods for determining the tensile strength when chipping along fibers: GOST 16483.5–73. M. : IPK Publishing House of Standards, 1999. 6 p.
20. Wood. Method for determining static hardness: GOST 16483.17–81. M. : Publishing House of Standards, 1999. 5 p.
21. Wood. General requirements for physico-mechanical tests: GOST 16483.0-89. M. : Publishing House of Standards, 1999. – 10 p.
22. Wood. Indicators of physical and mechanical properties of small pure samples: GSSSD 69-84. M. : Publishing House of Standards, 1985. 29 p .
23. Borovikov A.M., Ugolev B.N. Handbook of wood / edited by B.N. Ugolev. M. : Lesnaya prom-st, 1989. 296 p.
24. GOST 19222-2019. Arbolit and products made from it. General technical conditions. M. : Standartinform, 2019. 36 p.