

На правах рукописи



АВДЮКОВА ОКСАНА ДМИТРИЕВНА

**СИНТЕЗ АКТИВНЫХ ДРЕВЕСНЫХ УГЛЕЙ И ОЦЕНКА
ЭФФЕКТИВНОСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ
В ПРОИЗВОДСТВЕ СЛАБОУАКОГОЛЬНЫХ НАПИТКОВ**

4.3.4 «Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства
и переработки древесины»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Екатеринбург

2025

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Уральский государственный лесотехнический университет»

Научный руководитель: **Юрьев Юрий Леонидович**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Тимербаев Наиль Фарирович**
доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет»

Спицын Андрей Александрович
кандидат технических наук, доцент ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова»

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова»

Защита диссертации состоится «**26**» февраля 2026 года в 10-00 на заседании диссертационного совета 24.2.424.01 при ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» по адресу: 620100 г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 37, аудитория 1-401.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» (www.usfeu.ru).

Автореферат разослан «___» декабря 2025 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор



Шишкина Елена Евгеньевна

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Сорбенты различных марок, полученные активацией древесных углей, широко применяются во многих сферах народного хозяйства, в том числе в пищевой промышленности. Основным сырьем для производства активных древесных углей в России традиционно является уголь из березовой древесины, поскольку получаемая из него продукция имеет сравнительно высокую механическую прочность и низкую зольность. В то же время перспективной сырьевой базой для производства активных древесных углей, по нашему мнению, является древесина сосны и осины. Сосновая древесина по своим качественным характеристикам немногим уступает березе, получаемый продукт также отличается пониженной зольностью и сравнительно высокой механической прочностью. Преимущество осины состоит в том, что она является быстрорастущей породой, в первую очередь занимающей площади после вырубок. К тому же основные ареалы распространения осины ближе расположены к наиболее заселенным территориям, чем береза и сосна. Данное обстоятельство свидетельствует о возможном снижении себестоимости активных углей, полученных на основе древесины осины, за счет уменьшения логистических расходов. В связи с вышесказанным считаем, что задача проведения сравнительной оценки условий пиролиза и активации, исследования сорбционных свойств активных древесных углей, получаемых из указанных пород, является актуальной.

Степень разработанности темы. Большой вклад в изучение вопросов синтеза древесных и активных углей из древесины различных пород внесли отечественные деятели науки, такие как М. М. Дубинин, Н. И. Богданович, В. С. Петров, В. Н. Пиялкин, Р. Г. Сафин, Р. Р. Сафин, Ю. Л. Юрьев и др. Ими изучены особенности технологии и свойства активных древесных углей, получаемых из березы и сосны. На наш взгляд научный и практический интерес заключается в возможности расширения сырьевой базы для производства углеродных нанопористых материалов и их применения в различных отраслях промышленности.

Цель работы – изучение закономерностей синтеза активных углей на основе березовой, осиновой, сосновой древесины для их эффективного применения в производстве слабоалкогольных напитков.

Для реализации данной цели поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Получить образцы активных углей с различным уровнем развития мезо- и микропористости из древесины сосны, осины, березы при варьированных технологических параметрах процессов пиролиза и активации.

2. Изучить процессы сорбции активными древесными углями белковых и полифенольных соединений из модельных растворов, пивного сусла и пива.

3. Обосновать аппаратно-технологическую схему получения и эффективного применения активных древесных углей в производстве слабоалкогольных напитков с целью повышения их коллоидной стойкости и интенсификации процесса ферментации.

Объект исследования – активные угли на основе сосновой, березовой, осиновой древесины.

Предмет исследования – факторы пиролиза и активации, оказывающие влияние на выход и сорбционные свойства активных углей, на основе древесины березы, сосны, осины.

Научная новизна

1. Впервые обоснованы рациональные параметры получения активных углей на основе березы, сосны и осины с возможностью их применения для сорбции соединений с низкой и сравнительно высокой молекулярной массой при производстве слабоалкогольных напитков.

2. Впервые выявлены закономерности сорбции белков и полифенольных соединений активными углями на основе осиновой древесины в сравнении с активными углями на основе древесины березы и сосны.

3. Впервые обоснована эффективность применения активного угля на основе древесины осины в производстве слабоалкогольных напитков с целью повышения их коллоидной стойкости и интенсификации процесса ферментации.

Теоретическая значимость работы. Дана сравнительная оценка основных действующих факторов процессов пиролиза и активации углей из древесины сосны, березы, осины на выход и свойства получаемых активных углей.

Практическая значимость. Показана возможность использования активных древесных углей из различных пород древесины в производстве слабоалкогольных напитков с целью повышения качественных и технико-экономических показателей производства.

Разработана технология обработки пивного сусла активным древесным углем на основе осины. Результаты диссертационного исследования использованы в практической деятельности ООО «Дикий хмель» (п. Белоярский Свердловской области).

Методология и методы исследования

В работе применялась традиционная методология и современные методы научных исследований, в том числе физико-химические, математические методы анализа, теория факторного эксперимента, регрессионного анализа, вычислительные и графические программы. Работа проводилась в научно-исследовательской лаборатории УГЛТУ в соответствии с методическими указаниями.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Влияние основных действующих факторов процесса пиролиза древесины различных пород на выход и свойства получаемых древесных углей из древесины березы, сосны и осины.

2. Закономерности влияния основных действующих факторов процесса активации на выход и свойства получаемых активных углей из древесины березы, сосны и осины.

3. Оценка эффективности применения активного угля на основе древесины осины в производстве слабоалкогольных напитков.

Соответствие диссертационной работы паспорту научной специальности. Результаты, выносимые на защиту, относятся к пункту 2 «Химия, физико-химия и биохимия основных компонентов биомассы дерева и иных одревесневших частей растений, композиты, продукты лесохимической переработки», пункту 4 «Технология и продукция в производствах: лесохозяйственном, лесозаготовительном, лесопильном, деревообрабатывающем, целлюлознобумажном, лесохимическом и сопутствующих им производствах». Паспорт научной специальности 4.3.4 «Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины».

Степень достоверности научных положений, рекомендаций и выводов.

Обоснованность итоговых выводов и представленных данных настоящей работы обеспечиваются многократным повторением экспериментов, использованием актуальных библиографических источников научной литературы, последовательностью этапов выполнения исследовательской программы и достижением поставленной цели диссертационного исследования.

Личный вклад автора. Автором сформулированы основные идеи в постановке и решении задач по теме диссертации. Автором синтезированы исследуемые образцы активных углей. При непосредственном участии автора проведены лабораторные и опытно-промышленные испытания, полученных активных углей.

Апробация работы. Материалы, изложенные в диссертации, докладывались и обсуждались в докладах автора на всероссийских и международных научно-технических конференциях:

XIV Международной научно-технической конференции. Екатеринбург, 2023;

XX Всероссийской (национальной) научно-технической конференции. Екатеринбург, 2024;

XXXV Международной научно-практической конференции. Тула, 2024;

XXIV Международной научно-технической Интернет-конференции «Лесной комплекс: состояние и перспективы развития», 2024;

XXV Международной научно-технической Интернет-конференции «Лес – 2025».

Публикации. По результатам диссертационных исследований опубликовано 10 работ, в их числе 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, выводов и рекомендаций, приложения, списка литературы, включающего 162 наименования. Общий объем работы 135 страниц, 49 рисунков, 16 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов проведенных исследований, приведены положения, выносимые на защиту, структура, объем работы и ее апробация.

В **первой главе** проведен аналитический обзор научно-технической и патентной информации по теме диссертационной работы. Представлена характеристика структуры и свойств древесного угля (ДУ), рассмотрены и проанализированы вопросы получения активного угля (АУ), особенности их строения, свойств и применения в пищевой промышленности и, в частности, в производстве слабоалкогольных напитков. Обоснован выбор направления исследований диссертационной работы.

Во **второй главе** описаны методики получения и анализа активных углей, полученных из древесины березы, осины и сосны, определения их структуры, свойств и расчета сорбционных и кинетических характеристик.

В **третьей главе** приведены результаты экспериментальных исследований закономерностей синтеза образцов АУ на основе сосны, осины, березы. Для образцов ДУ, полученных в сопоставимых условиях, проведена сравнительная оценка выхода, определены: содержание массовой доли нелетучего углерода, насыпная плотность, суммарный объем пор по воде, массовая доля золы, адсорбционная активность по йоду.

Проведенные исследования образцов активного угля березы АУ (бер), активного угля осины АУ (ос), активного угля сосны АУ (с) позволяют сделать сравнительные оценки по сорбционным свойствам и выходу полученных нанопористых углеродных материалов.

Сравнительные характеристики адсорбционной активности по йоду и метиленовому синему активных углей из березы, осины и сосны

На рисунках 1 и 2 представлены зависимости влияния температуры активации водяным паром на адсорбционные свойства активных углей, полученных на основе березового ДУ при разных температурах пиролиза (400, 600 и 800 °С) – АУ (бер, 400), АУ (бер, 600) и АУ (бер, 800) соответственно.

Анализируя рисунок 1, можно сделать вывод, что повышение температуры активации до 850 °С способствует значительному увеличению йодной активности березовых АУ, особенно ярко выраженной для образцов, полученных при температуре пиролиза 600 °С. Это связано с тем, что на стадии пиролиза происходит значительное образование низкомолекулярных летучих веществ из лигноуглеводной матрицы, что обеспечивает вскрытие микропор и приводит к резкому увеличению их объема.

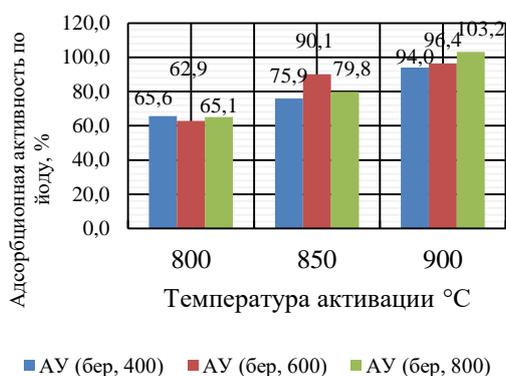


Рисунок 1 – Зависимость влияния температуры активации на адсорбционную активность по йоду для АУ, полученных из березовых ДУ при разных температурах пиролиза

Результаты, представленные на рисунке 2, свидетельствуют, что максимальные значения адсорбционной активности по метиленовому синему для АУ (бер) достигаются при температуре пиролиза 800 °С. Это связано с разрушением аморфной структуры древесного угля, что благоприятно сказывается на формировании как первичной, так и вторичной мезопористой структуры.

При температуре пиролиза 600 °С происходят вторичные процессы поликонденсации, которые вызывают формирование более упорядоченной структуры угля, которая препятствует развитию мезопор в процессе активации. При использовании низких температур пиролиза ($T = 400$ °С) вышеуказанные явления не происходят, что приводит к увеличению сорбционной активности по метиленовому синему.

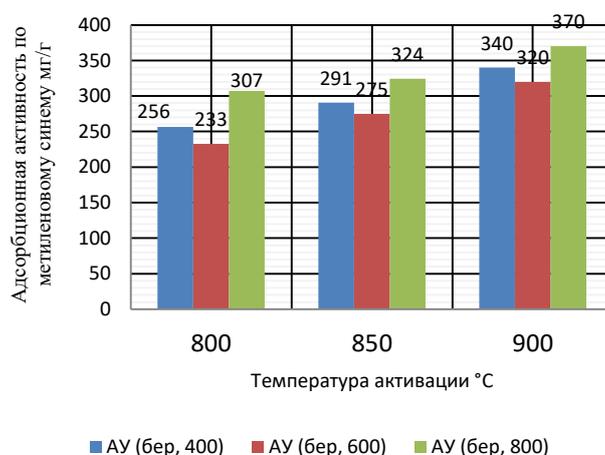


Рисунок 2 – Зависимость влияния температуры активации на адсорбционную активность по метиленовому синему для АУ, полученных из березовых ДУ при разных температурах пиролиза

Результаты зависимости влияния температуры активации на адсорбционные свойства активных углей, полученных из осинового ДУ при разных температурах пиролиза, представлены на рисунках 3 и 4.

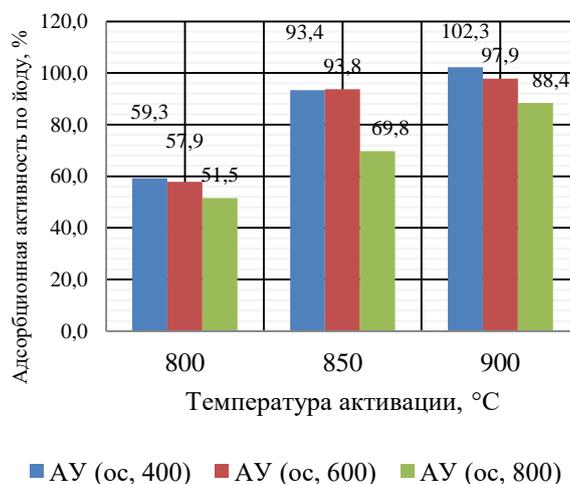


Рисунок 3 – Зависимость влияния температуры активации на адсорбционную активность по йоду АУ, полученных из осиновых ДУ при разных температурах пиролиза

Из рисунка 3 видно, что наибольшая адсорбционная активность по йоду наблюдается у АУ (ос, 400) при температуре активации 900 °С и составляет 102,3 % от массы угля, что связано с максимальным раскрытием микропор АУ осины при данном режиме активации. Особенностью осины является то, что ее структура рыхлая, пористая и при использовании высоких температур при пиролизе происходит разрушение стенок пор, что позволяет сделать вывод о низкой устойчивости углеродной матрицы осинового угля к воздействию высоких температур.

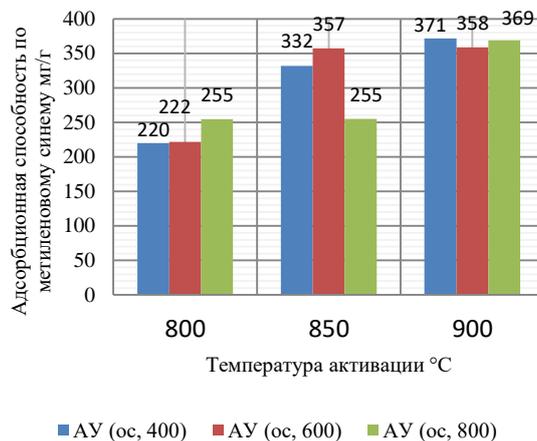


Рисунок 4 – Зависимость влияния температуры активации на адсорбционную активность по метиленовому синему для АУ, полученных из осиновых ДУ при разных температурах пиролиза

Из рисунка 4 видно, что максимальная сорбционная способность АУ (ос) относительно метиленового синего достигается при температуре пиролиза 400°С с последующей активации материала при температуре 900 °С и составляет 371 мг/г. С ужесточением режима активации происходит разрушение жестких упорядоченных структур и наблюдается образование вторичной мезопористости.

На рисунках 5 и 6 представлены зависимости влияния температуры активации на адсорбционные свойства АУ, полученных из сосновых ДУ при разных температурах пиролиза.

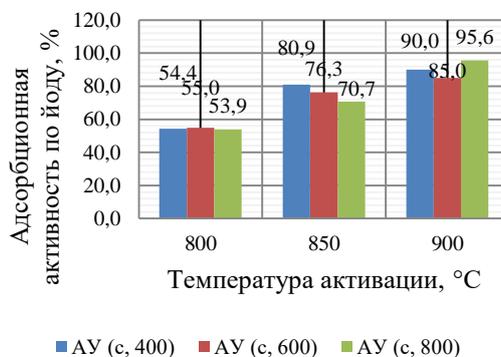


Рисунок 5 – Зависимость влияния температуры активации на адсорбционную активность по йоду для активных углей, полученных из сосновых ДУ при разных температурах пиролиза

Из рисунка 5 видно, что при сравнительно мягких условиях активации температура пиролиза заметного влияния на сорбционную активность сосновых АУ по йоду не оказывает.

Наибольшая адсорбционная активность по йоду наблюдается у АУ (с) при температуре пиролиза 800 °С, температуре активации 900 °С и составляет 95,6 % от массы угля, что связано с максимальным раскрытием микропор древесины сосны при данном режиме.

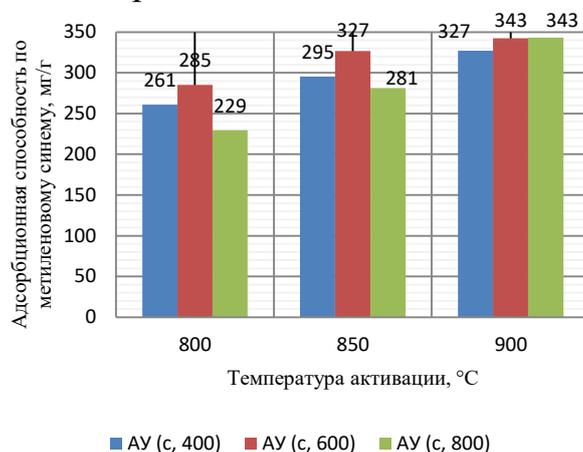


Рисунок 6 – Зависимость влияния температуры активации на адсорбционную активность по метиленовому синему для АУ, полученных из сосновых ДУ при разных температурах пиролиза

Данные рисунка 6 свидетельствуют о том, что при температуре пиролиза 600 °С в связи с особенностью строения хвойных пород древесины разрушается аморфная структура угля, что благоприятно сказывается на формировании первичной и вторичной мезопористой структур, и при максимальных режимах активации наблюдается наибольшая адсорбционная активность по метиленовому синему – 343 мг/г.

АУ на основе березового, осинового и соснового ДУ с выбранными нами режимами пиролиза и активации соответствуют требованиям ГОСТ 6217 для древесных активных дробленых углей по адсорбционной активности по йоду и ГОСТ 4453 для активных осветляющих углей по метиленовому синему.

АУ полученные из древесины осины, имеют более открытую пористую структуру, что влияет на сравнительно высокие адсорбционные свойства, как по йоду, так и по метиленовому синему.

Исследование закономерностей активации. Полученные экспериментальные данные подвергнуты статистической обработке посредством метода факторного анализа, результатом которого стало построение уравнения регрессии, отражающего влияние основных переменных на выходные параметры процесса. Параметрами отклика были выбраны:

Y_1 – выход активного угля (% от массы древесного угля);

Y_2 – адсорбционная активность по йоду (%);

Y_3 – адсорбционная активность по метиленовому синему (%).

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о возможности управления технологическими характеристиками АУ путем варьирования условий обработки, обеспечивая соответствие стандартам качества и спецификациям конечного продукта.

В качестве варьируемых параметров применены:

X_1 – температура;

X_2 – удельный расход водяного пара;

X_3 – продолжительность активации.

В результате получены математические модели в кодированном виде, адекватно описывающие зависимость выхода, адсорбционной активности по йоду и метиленового синего от основных действующих факторов процесса активации.

Математические модели для осинового угля, полученного при температуре пиролиза 400 °С:

$$Y_1 = 48,75 - 5,5x_1 - 6,75x_2 - 2x_3. \quad (1)$$

$$Y_2 = 81,575 + 5,25x_1 + 7x_2 + 5,5x_3. \quad (2)$$

$$Y_3 = 306,375 + 46,375x_1 + 13,875x_2 + 16,375x_3. \quad (3)$$

Математические модели для березового угля, полученного при температуре пиролиза 800 °С:

$$Y_1 = 64,88 - 6,88x_1 - 1,88x_2 - 1,38x_3. \quad (4)$$

$$Y_2 = 91,54 + 7,76x_1 + 5,51x_2 + 3,26x_3. \quad (5)$$

$$Y_3 = 308,5 + 21,75x_1 + 6,5x_2 + 4,5x_3. \quad (6)$$

Математические модели для соснового угля, полученного при температуре пиролиза 600 °С:

$$Y_1 = 70,625 - 7,125x_1 - 2,125x_2 - 1,125x_3. \quad (7)$$

$$Y_2 = 81,81 + 8,846x_1 + 6,09x_2 + 3,59x_3. \quad (8)$$

$$Y_3 = 287,63 + 20,13x_1 + 17,13x_2 + 12,13x_3. \quad (9)$$

Для наглядности по уравнениям регрессии для угля осины, полученного при температуре пиролиза 400 °С, как угля, рекомендованного для сорбции низкомолекулярных соединений и соединений со сравнительно высокой молекулярной массой, были построены диаграммы зависимости функций отклика от параметров активации. Зависимость выхода осинового активного угля от температуры активации и удельного расхода пара показана на рисунке 7. Зависимость адсорбционной активности по йоду АУ осины от температуры активации и удельного расхода пара показана на рисунке 8. Зависимость адсорбционной активности по метиленовому синему АУ осины от температуры активации и удельного расхода пара показана на рисунке 9.

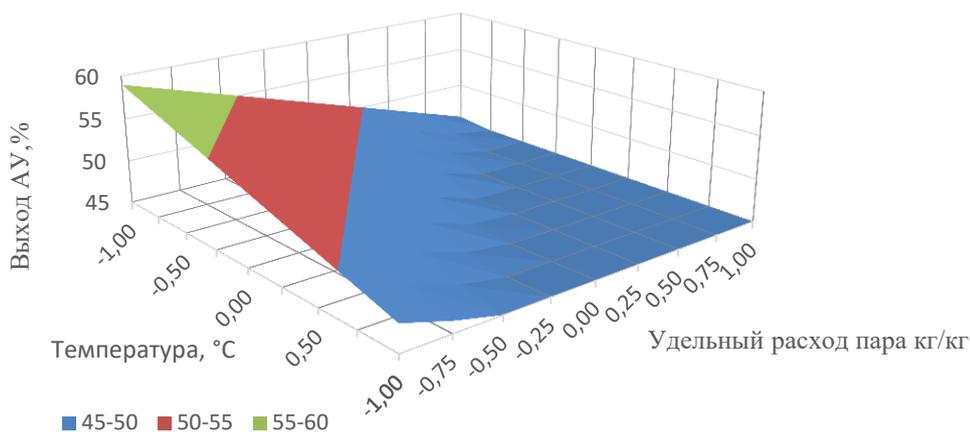


Рисунок 7 – Зависимость выхода осинового активного угля от температуры активации и удельного расхода пара

На выход АУ из осины в большей степени оказывает влияние удельный расход водяного пара, менее значимо влияние температуры и наименьшее влияние оказывает продолжительность активации.

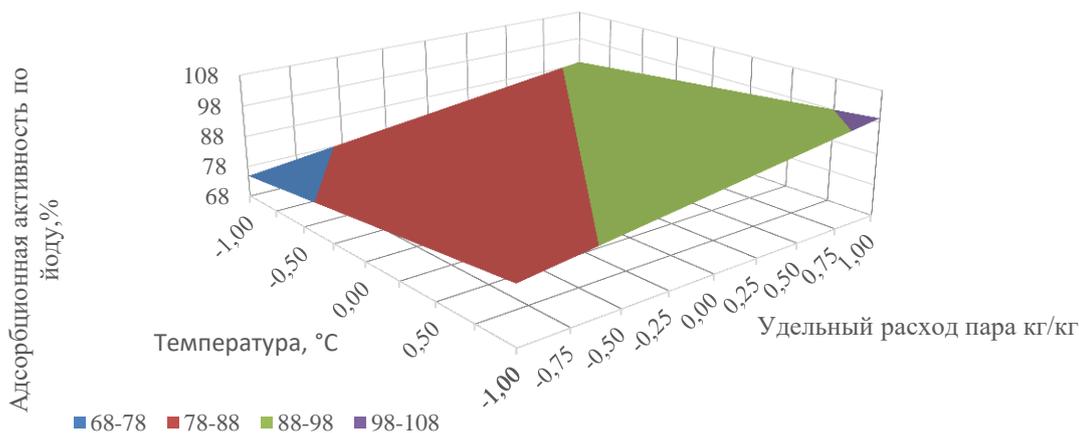


Рисунок 8 – Зависимость адсорбционной активности по йоду осинового АУ от температуры активации и удельного расхода пара

На адсорбционную активность по йоду АУ из осины в большей степени оказывает влияние удельный расход водяного пара, менее значима продолжительность активации и наименьшее влияние оказывает влияние температуры.

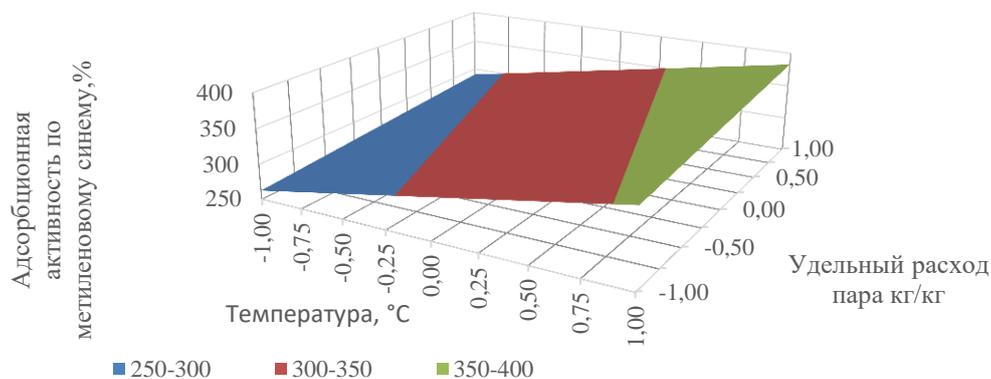


Рисунок 9 – Зависимость адсорбционной активности по метиленовому синему АУ осины от температуры активации и удельного расхода пара

На адсорбционную активность по метиленовому синему АУ из осины в большей мере влияет температура процесса активации. Несколько меньшее влияние оказывает продолжительность процесса активации, а влияние удельного расхода пара в исследованном диапазоне является незначимым.

Экспериментальные данные свидетельствуют о влиянии всех изученных факторов на уменьшение выхода образцов АУ. Наибольшее воздействие на сорбционную активность по йоду осинового угля оказывает удельный расход пара, а для сорбционной активности по метиленовому синему определяющим фактором становится температура. Адсорбционная активность берёзового и соснового угля по отношению к йоду и метиленовому синему главным образом зависит от температурного режима, тогда как продолжительность процесса активации имеет наименьшее значение для всех исследуемых образцов.

Для сравнительной оценки химического состава и структурной организации экспериментальные образцы АУ на основе различных пород древесины проанализированы методом ИК спектроскопии с применением ИК-Фурье спектрометра ФСМ 2203, фирмы Инфраспек, Россия.

На рисунке 10 представлены ИК-спектры образцов АУ березы, осины и сосны, синтезированные при температуре пиролиза 800 °С, температуре активации 900 °С, удельном расходе пара – 1,8 кг/кг ДУ, продолжительности процесса активации – 100 мин.

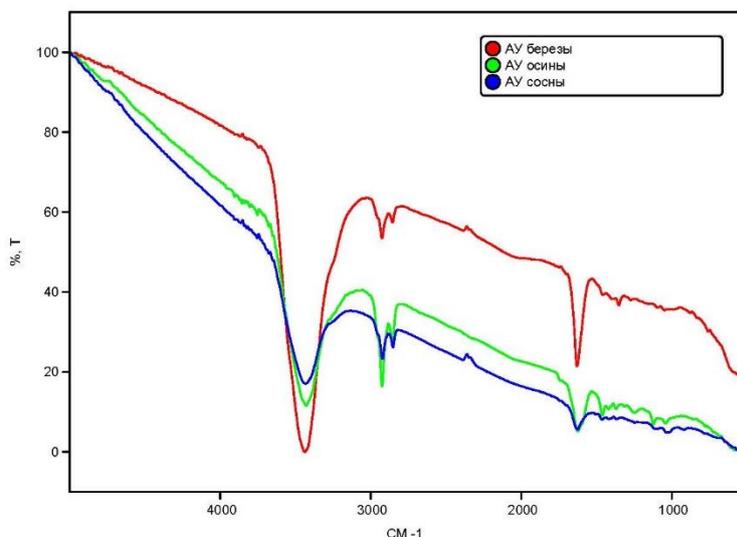


Рисунок 10 – ИК-спектры образцов активных углей, полученных при температуре пиролиза 800 °С, температуре активации 900 °С, удельный расход пара – 1,8 кг/кг древесного угля, продолжительность процесса активации – 100 мин

Для всех исследуемых образцов (АУ сосны, березы, осины) зафиксированы общие полосы поглощения на частотах с максимумом поглощения.

Полоса с $\nu = 1620 \dots 1690 \text{ см}^{-1}$ характерна для валентных колебаний карбониллов, карбоксиллов, связанных водородными связями с соседними группировками.

Полоса с $\nu = 2920...2850 \text{ см}^{-1}$ свидетельствует о наличии поверхностных –СН-групп метильных и метиленовых группировок.

Полоса с $\nu = 3430...3650 \text{ см}^{-1}$ характерна для -ОН групп на поверхности АУ, образующихся, как правило, в процессе активации водяным паром.

По результатам проведенных спектральных исследований можно сделать вывод, что на поверхности березовых АУ зафиксировано большее количество полярных –ОН групп, в сравнении с АУ осины и сосны. Вместе с тем, поверхностных неполярных –СН групп больше у образцов АУ из осины, таким образом, можно предположить, что сорбционные свойства березового и осинового АУ будут меняться в зависимости от полярности сорбируемых соединений.

На основании полученных данных можно сделать некоторые обобщения относительно сорбционных свойств экспериментальных АУ из разных пород древесины в процессе пиролиза и активации, что показано в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Рекомендуемые режимы обработки для получения активных углей, применяемых для сорбции низкомолекулярных соединений

Параметры	Порода древесины		
	береза	осина	сосна
Температура пиролиза, °С	800	400	800
Температура активации, °С	900	900	900
Продолжительность активации, мин	100	100	100
Удельный расход пара, кг/кг ДУ	1,8	1,8	1,8
Характеристика продукта			
Адсорбционная активность по йоду, %	103,2	102,3	95,6

Из таблицы 1 следует, что более высокой сорбционной активностью по йоду обладают АУ (бер, 800) и АУ (ос, 400). Данный факт позволяет рекомендовать указанные режимы синтеза углеродных сорбентов с целью применения их для сорбции низкомолекулярных соединений.

Таблица 2 – Рекомендуемые режимы обработки для получения активных углей, применяемых для сорбции соединений со сравнительно высокой молекулярной массой

Параметры	Порода древесины		
	береза	осина	сосна
Температура пиролиза, °С	800	400	600
Температура активации, °С	900	900	900
Продолжительность активации, мин	80	100	100
Удельный расход пара, кг/кг ДУ	1,8	1,8	1,8
Характеристика продукта			
Адсорбционная активность по метиленовому синему, мг/г	370	371	343

Из данных таблицы 2 можно сделать вывод, что наибольшей сорбционной активностью по метиленовому синему обладают АУ (бер, 800) и АУ (ос, 400). Данный факт позволяет рекомендовать указанные режимы

синтеза углеродных сорбентов с целью применения их для сорбции соединений со сравнительно высокой молекулярной массой.

В четвертой главе приведена экспериментальная оценка сорбционных свойств исследуемых образцов АУ из древесины березы, осины, сосны, описаны результаты исследования процессов адсорбции танинов из модельных растворов полученными АУ.

Нами исследованы процессы адсорбции танина синтезированными экспериментальными АУ. На рисунке 11 приведены изотермы сорбции.

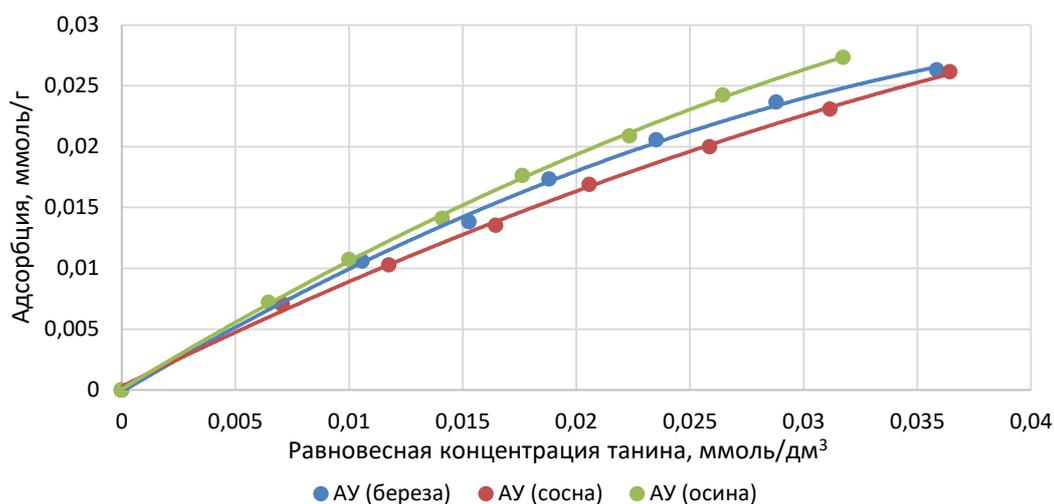


Рисунок 11 – Изотермы сорбции танина экспериментальными углями

Изотермы сорбции танина экспериментальными АУ демонстрируют максимальную активность осинового АУ, менее эффективным является АУ из березы, наименьшие значения – при обработке сосновым АУ.

Для описания процесса адсорбции использованы следующие модели: Ленгмюра, Фрейндлиха, БЭТ, Темкина, Дубинина-Радушкевича, Френкеля-Хелси-Хилла, Флори-Хаггинса, Гаркинса-Джура.

Результаты обработки данных показали, что наиболее адекватно процесс описывают модели Ленгмюра и Фрейндлиха.

В таблице 3 приведены рассчитанные значения констант сорбции танина исследуемыми углями.

Таблица 3 – Рассчитанные значения констант сорбции танина исследуемыми углями

Образец АУ	Предельная сорбция, A_{∞} , ммоль/г	Константа Ленгмюра, K_L	Коэффициент разделения, R_L	Константы Фрейндлиха	
				K_F	n
Березовый	0,095	11,53	0,38	0,43	0,82
Сосновый	0,065	16,86	0,29	0,38	0,81
Осиновый	0,096	12,46	0,36	0,51	0,84

Как известно, высокие значения предельной сорбции и низкие значения константы Ленгмюра характерны для сорбентов с высокой активностью. Полученные результаты свидетельствуют, что максимальной предельной адсорбцией характеризуются осиновый и березовый активные угли.

Константа Фрейндлиха K_F , характеризующая сорбционную способность, имеет наибольшее значение для осинового угля.

Константа n , оценивающая интенсивность взаимодействия сорбента с адсорбатом, свидетельствует, что по мере заполнения поверхности энергия связей возрастает для всех испытываемых АУ.

На основании рассчитанных значений констант сорбции можно сделать вывод о том, что на процессы адсорбции танинов из модельных растворов активными углями в большей мере влияют диффузионные процессы.

Рассчитанные нами показатели энергии Гиббса имеют отрицательные значения. Для образца АУ березы значение составляет -6058 Дж/моль; АУ сосны -6999 Дж/моль; АУ осины -6250 Дж/моль.

Отрицательные значения энергии Гиббса свидетельствуют о самопроизвольном протекании процесса адсорбции танина на всех исследуемых АУ.

В работе исследовано влияние обработки пивного сусла активным углем осины на кинетические характеристики роста дрожжей, потребления субстрата и биосинтеза этилового спирта в процессе брожения. Экспериментальный образец АУ осины получен при температуре пиролиза 400 °С, температуре активации – 900 °С, удельный расход пара ставил 1,8 кг/кг ДУ, продолжительность процесса активации 100 мин.

Результаты исследования представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты оценки эффективности биотехнологического процесса

Показатель	Контроль	Опыт	Отклонение, %
Y_{P_k/R_0} (бродильная активность дрожжей), г продукта/г продуцента	10,62	11,41	+ 7,44
Экономический коэффициент по биомассе $Y_{X/S}$, г биомассы/г субстрата	0,0129	0,0139	+ 7,75
Экономический коэффициент по этанолу $Y_{P/S}$, г продукта/г субстрата	0,378	0,386	+ 2,12
Метаболический коэффициент $Y_{S/P}$ (расход субстрата на биосинтез этанола), г субстрата/г продукта	2,646	2,591	-2,08
Скорость биосинтеза этанола мл/(г субстрата·ч)	0,0297	0,0325	+ 9,4
Удельная скорость роста биомассы, ч ⁻¹	0,0060	0,0067	+ 11,6
Скорость прироста биомассы, г/ч	0,010	0,011	+ 10
Скорость потребления субстрата, г субстрата/(г дрожжей·ч)	0,15	0,17	+ 13,3

В качестве контрольного субстрата - сусло без дополнительной обработки, в качестве опытного субстрата – сусло после сорбционной обработки активным осветляющим углем осины. Дозировка АУ 0,1 % в массу сусла. Продолжительность обработки сусла АУ на основе осины составила 10...15 мин.

В качестве продуцента использовали сухие элевые дрожжи верхового брожения *Saccharomyces cerevisiae* марки Brewingham Wheat BVG-03.

Результаты исследования свидетельствует о повышенной интенсивности метаболизма дрожжей, характеризующейся ускоренным потреблением питательного материала. Обработка сусла АУ на основе осины способствует поддержанию метаболической активности дрожжей на поздних этапах брожения.

В **пятой главе** описаны технологические схемы и экономическое обоснование применения синтезированных активных углей.

Нами предложена схема активации древесного угля (рисунок 12).

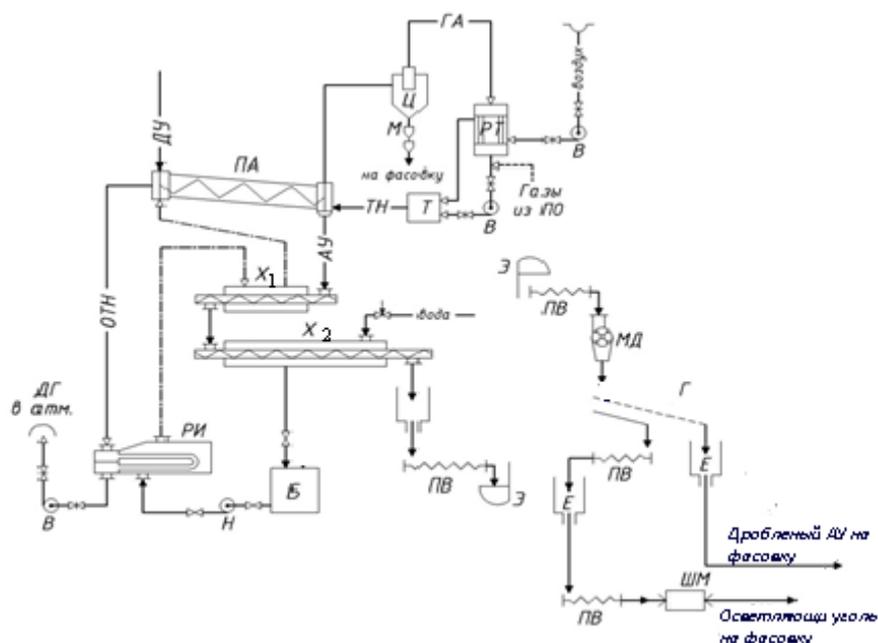


Рисунок 12 – Технологическая схема производства активных углей из древесного угля: Оборудование: ПА – печь активации; РИ – рекуператор-испаритель; РТ – рекуператор; Х1, Х2– холодильник первой и второй ступени соответственно; ДШ – дозатор шлюзовый; ПВ – питатель винтовой; П – питатель; Э – элеватор; МД – молотковая дробилка; ШМ – шаровая мельница; Г – грохот; Т – топка; Ц – циклон; В – вентилятор; Е – бункер; М – затвор типа «Мигалка»; Б – бак; ТН – теплоноситель; ОТН – отработанный теплоноситель; ГА– газы активации; ДУ– древесный уголь; АУ – активный уголь; ДГ– дымовые газы

Рекомендовано осуществлять активацию древесного угля во вращающейся барабанной печи. Применение вращательно-зигзагообразной вставки обеспечивает периодическое изменение давления внутри рабочего канала в диапазоне 100...7000 Па на протяжении полного цикла активационного процесса при коэффициенте заполнения канала до 50%, что позволяет повысить выход активного угля и снизить его себестоимость. Рекомендуется подавать газы активации непосредственно в топочную камеру для их последующего сжигания с целью выработки теплоносителя. Использование внешнего подвода тепла на

этапе активации способствует увеличению тепловой мощности газов активации путем предотвращения их смешивания с транзитным теплоносителем. Отсутствие теплоносителя в области активации замедляет движение газовых потоков, существенно снижая вероятность уноса готового продукта из аппарата.

За основу технологического процесса принята классическая схема производства пива, существующая на ООО «Дикий хмель» п. Белоярский Свердловской области.

На основании проведенных исследований рекомендовано ввести дополнительную стадию - обработка пивного суслу углеродным нанопористым материалом для повышения эффективности брожения и улучшения качества пива. Сорбционная обработка суслу осиновым углем позволяет значительно улучшить прозрачность, стабильность и вкусовые характеристики готового продукта за счет эффективного удаления коллоидных и высокомолекулярных соединений (белков, полифенолов, хмелевых смол), а также позволяет снизить нагрузку на дрожжи и улучшать кинетику брожения.

Нами рекомендована технологическая схема сорбционной обработки пивного суслу осиновым активным углем (рисунок 13).

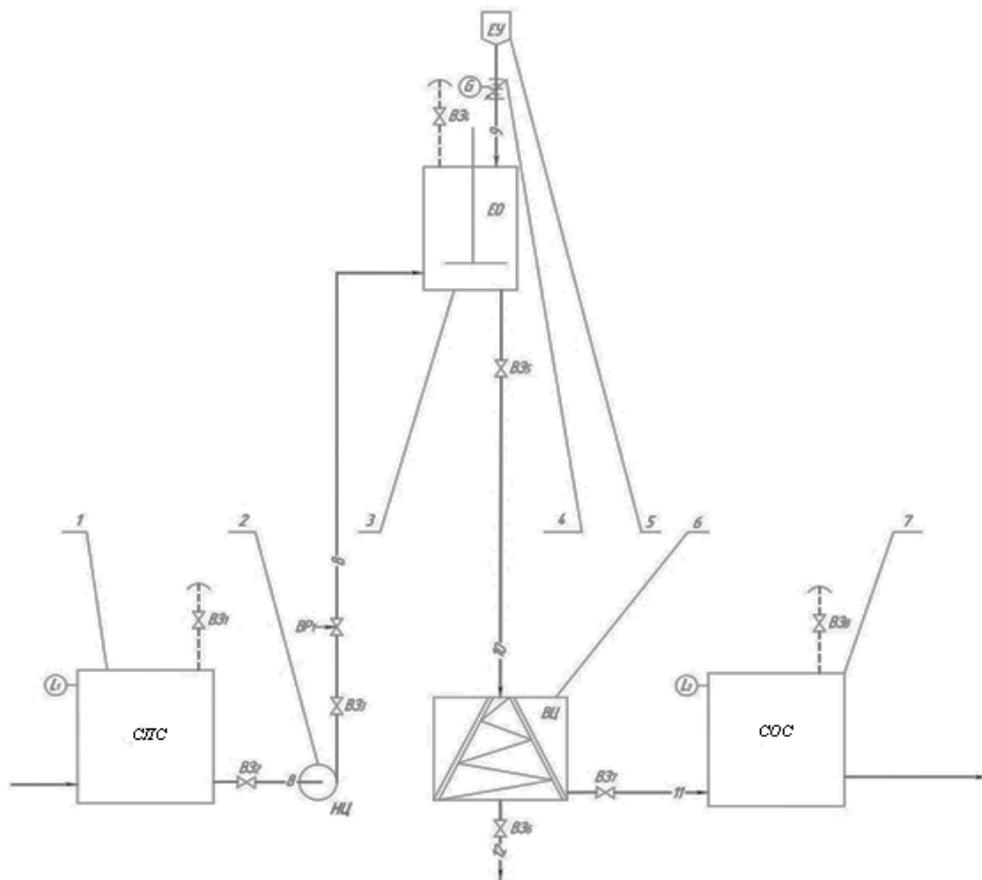


Рисунок 13 – Технологическая схема сорбционной обработки пивного суслу осиновым углем

Оборудование: СПС (1) – сборник подготовленного суслу, (2) – центробежный насос, ЕО (3) – емкость обработки суслу углем с мешалкой, ЕУ (5) – емкость с углем, ВД (4) – весовой дозатор, ВЦ (6) – вертикальная центрифуга, СОС (7) – сборник обработанного суслу.

Технологическая схема производства пива с дополнительной стадией сорбционной обработки суслу активным углем осины оказывает положительное влияние на ключевые параметры брожения (табл. 5).

Для повышения коллоидной стойкости пива за счет снижения содержания белков (на 35...40%) и полифенольных соединений (на 40...45%) нами рекомендована технология обработки нефilterованного пива осиновым активным углем, схема которой представлена на рисунке 14.

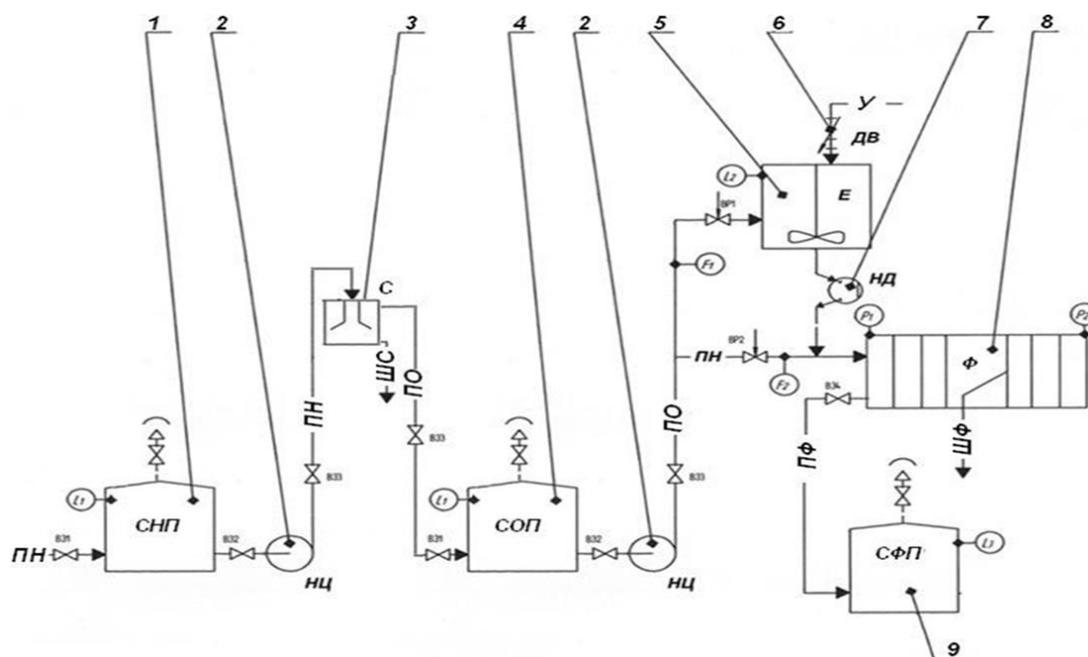


Рисунок 14 – Схема обработки нефilterованного пива активным осиновым углем

Оборудование: 1 – сборник нефilterованного пива (СНП); 2 – насос центробежный (НЦ); 3 – сепаратор (С); 4 – сборник осветленного пива (СОП); 5 – емкость для обработки пива углем (Е); 6 – дозатор весовой (ДВ); 7 – насос дозирующий (НД); 8 – фильтр-пресс (Ф); 9 – сборник фilterованного пива (СФП).

Потоки: ПН – пиво нефilterованное; ПО – пиво осветленное; ШС – шлам сепарации; У – уголь марки ОУ-А; ПФ – пиво фilterованное; ШФ – шлам фilterации.

Использование АУ осины позволяет не только улучшить органолептические свойства пива, но и повысить его стабильность при хранении, что является значимым преимуществом для производителей. Отработанный сорбционный материал может быть использован в сельском хозяйстве, что не требует специальных операций утилизации.

Оценка экономической эффективности. На основании проведенных расчетов и комплексного анализа экономических показателей можно сделать следующие выводы: внедрение участка сорбционной обработки пива с использованием активного угля осины является экономически целесообразным. Предлагаемая технология позволяет снизить ущерб от возврата пива по причине помутнения на 1,12 млн руб., а также перейти к выпуску более качественного пива с повышением его стоимости. Данные мероприятия позволяют увели-

чить валовую прибыль на 16,6 %, что способствует повышению рентабельности производства с 48,1 до 54,9 %.

Полученные экономические расчеты свидетельствуют о существенном позитивном влиянии предлагаемого технологического процесса на финансовые показатели деятельности организации.

Общие выводы и рекомендации

В ходе исследования были сделаны следующие выводы и даны рекомендации:

1. Получены образцы активных углей с различным уровнем развития мезо- и микропористости из древесины сосны, осины, березы при варьированных технологических параметрах процессов пиролиза и активации.

2. Изучены процессы сорбции активными древесными углями белковых и полифенольных соединений из модельных растворов, пивного сула и пива.

3. Обоснована аппаратурно-технологическая схема получения и эффективного применения активных древесных углей в производстве слабоалкогольных напитков с целью повышения их коллоидной стойкости и интенсификации процесса ферментации.

4. Рекомендованы для практического применения режимы синтеза активных углей, применяемых для сорбции низкомолекулярных соединений и соединений со сравнительно высокой молекулярной массой в производстве слабоалкогольных напитков.

Основное содержание диссертационной работы отражено в следующих публикациях

Статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ:

1. Сравнительный анализ зависимости основных свойств древесного угля от содержания в нем нелетучего углерода / **О. Д. Авдюкова**, Ю. Л. Юрьев, И. К. Гиндулин, Т. С. Чиши // *Деревообрабатывающая промышленность*. – 2025. – № 1. – С. 102–110. – EDN HEIAOM.

2. Влияние сорбционных характеристик активного древесного угля на окислительно-восстановительные свойства водно-спиртовых растворов / **О. Д. Авдюкова**, Ю. Л. Юрьев, И. К. Гиндулин, Т. М. Панова // *Деревообрабатывающая промышленность*. – 2025. – № 1. – С. 77–86. – EDN LLQCSZ.

3. Сравнительная оценка сорбционных свойств активных углей из различных пород древесины / Ю. Л. Юрьев, И. К. Гиндулин, Т. М. Панова, **О. Д. Авдюкова**, Т. В. Штеба // *Леса России и хозяйство в них*. – 2025. – № 3 (94). – С. 193–204.

В сборниках докладов на конференциях:

4. Биочар и древесный уголь. Сходство и различия / **О. Д. Авдюкова**, И. К. Гиндулин, Ю. Л. Юрьев, Л. Г. Старцева // *Эффективный ответ на современные вызовы с учетом взаимодействия человека и природы, человека и технологий: социально-экономические и экологические проблемы лесного ком-*

плекса : материалы XIV международной научно-технической конференции, Екатеринбург, 08–09 февраля 2023 года. – Екатеринбург : УГЛТУ, 2023. – С. 448–452. – EDN YKLOMZ.

5. Биочар и промышленный древесный уголь на основе березовой древесины / **О. Д. Авдюкова**, Ю. Л. Юрьев, И. К. Гиндулин // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России : материалы XX Всероссийской (национальной) научно-технической конференции, Екатеринбург, 01–14 апреля 2024 года. – Екатеринбург : УГЛТУ, 2024. – С. 536–539. – EDN LYEYXI.

6. Некоторые особенности применения осинового угля / **О. Д. Авдюкова**, Ю. Л. Юрьев, Н. А. Дроздова // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России : материалы XX Всероссийской (национальной) научно-технической конференции, Екатеринбург, 01–14 апреля 2024 года. – Екатеринбург : УГЛТУ, 2024. – С. 540–543. – EDN IMVBSK.

7. Способы получения адсорбентов из древесины / **О. Д. Авдюкова** // Вестник молодого ученого БГИТУ : сборник статей, посвященный 95-летию университета, Брянск, 24 мая 2024 года. – Брянск : Брянский государственный инженерно-технологический университет, 2024. – С. 9–11. – EDN LRIKCI.

8. Древесный уголь: производство и применение в пищевой промышленности / **О. Д. Авдюкова** // Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2024. – № 66. – С. 322–325. – EDN XPRVQV.

9. Типы адсорбентов в технологии осветления пива / **О. Д. Авдюкова** // Приоритетные направления развития науки и технологий : сборник докладов XXXV Международной научно-практической конференции, Тула, 25 декабря 2024 года. – Тула, 2024. – С. 295–298. – EDN TAEUSA.

10. **Авдюкова, О. Д.** Адсорбция полифенолов на активном березовом угле как фактор, формирующий качество водно-спиртовых растворов / **О. Д. Авдюкова** // Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2025. – № 67. – С. 234–237. – EDN JGFNEY.

Отзывы на автореферат с заверенной подписью и указанием фамилии, имени, отчества, почтового адреса, наименования организации, должности и ученой степени (с указанием шифра специальности, по которой была защищена диссертация) лица, составившего отзыв, просим направлять по адресу: 620100, г. Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, 37, УГЛТУ, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.424.01, e-mail:d21228102@yandex.ru

Подписано в печать 12.12.2025. Объем 1,0 авт.л. Заказ №207. Тираж 100
620100, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 37. ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет». Сектор оперативной полиграфии РИО