

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Кемеровский государственный университет»

На правах рукописи



Миленький Илья Олегович

**ИССЛЕДОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА
ОХМЕЛЕНИЯ ПИВНОГО СУСЛА С ПОМОЩЬЮ РОТОРНО-
ПУЛЬСАЦИОННОГО АППАРАТА**

Специальность 05.18.12 – процессы и аппараты пищевых производств

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Бородулин Д.М.

Кемерово 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА ОХМЕЛЕНИЯ ПИВНОГО СУСЛА И ЕГО АППАРАТУРНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ	7
1.1 Анализ технологической схемы производства пива	7
1.2 Существующие способы охмеления пивного сусла.....	13
1.3 Оборудование для охмеления пивного сусла	15
1.4 Конструкции роторно-пульсационных аппаратов	21
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1.....	28
ГЛАВА 2. АППАРАТУРНОЕ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	29
2.1 Методики проведения экспериментальных исследований и обзор опытно-исследовательского стенда	29
2.2 Характеристики материалов, применяемых в экспериментальных исследованиях	33
2.3 Методы определения химических показателей пивного сусла	36
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2.....	38
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ.....	39
3.1 Результаты исследования процесса охмеления пивного сусла.....	39
хмелевым экстрактом, полученным на роторно-пульсационном аппарате.....	39
3.2 Результаты экспериментальных исследований процесса охмеления.....	48
пивного сусла хмелевым экстрактом, полученным на основе промывных вод.....	48
3.3 Регрессионный анализ.....	61
РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3	88
ГЛАВА 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В РОТОРНО-ПУЛЬСАЦИОННОМ АППАРАТЕ	89
4.1 Кибернетический подход на основе структурно-параметрической идентификации	89
РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4.....	103
ГЛАВА 5. ПРОМЫШЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ.....	104
5.1 Новый способ охмеления пивного сусла.....	104
5.2 Внедрение нового способа охмеления пивного сусла с помощью РПА в производство пива	106
РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 5	108
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	109
Список литературы.....	111
ПРИЛОЖЕНИЯ	121

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Растущая конкуренция в отрасли пивоварения привела к увеличению объёма продаж данной продукции, а также совершенствованию технологии и способов производства. Пивоваренные компании стремятся сократить экономические затраты и длительность технологических стадий, сохранив при этом качество пива.

Большинство пивоваренных предприятий постоянно модернизируют свое оборудование и совершенствуют технологические процессы производства пива. Оптимизацию процесса приготовления пива возможно проводить на всех этапах производства. Одним из важных этапов производства напитка является охмеление пивного сула. Эта стадия отвечает за формирование большинства органолептических характеристик будущего пива. Однако, применяемые в пивоваренном производстве способы охмеления сула обладают рядом ограничений, связанных с малой экстракцией горьких веществ хмеля в пиво. В связи с этим, исследования ученых направлены на разработку устройств, которые позволяют увеличивать производительность, экономично использовать сырье, снижать затраты на электроэнергию и сокращать время приготовления пива и пивных напитков. Решение данной проблемы может быть достигнуто за счет применения новых технологических способов и оборудования в производственном процессе. Обзор известного оборудования для охмеления пивного сула показал, что применение роторно-пульсационного аппарата (РПА) является перспективным способом для интенсификации процесса охмеления. Поэтому, исследования внедрения РПА в технологическую линию производства пива и разработка нового способа охмеления пивного сула, являются актуальными для пивоваренных производств.

Степень разработанности темы исследования. Значительный вклад в исследование и разработку современного оборудования, технологий изготовления пива и пивных напитков внесли следующие ученые: F. Glavachek, A. Lhotskiy, L. Narciss, V. Kunze, В.А. Помозова, Б.Н. Федоренко, В.Е. Балашов, П.М. Мальцев.

Существенный теоретический и экспериментальный вклад в исследование РПА внесли ученые: В.Н. Иванец, Г.Е. Иванец, В.А. Плотников, В.И. Биглер, П.П. Дерко, В.Ф. Юдаев, А.И. Зимин, А.М. Балабышко, М.А. Балабудкин, М.А. Промтов, P. Willems, A. Traiber, E. Rud, I. Nakam и другие. Их работы послужили научной базой для изучаемой темы.

Цель работы. Совершенствование процесса охмеления пивного сусла с применением роторно-пульсационного аппарата.

Задачи исследования:

1. изучить процесс и оборудование, применяемое для охмеления пивного сусла и определить пути его интенсификации;
2. исследовать процесс охмеления пивного сусла с применением хмелевого экстракта, полученного на основе пивного сусла и промывных вод;
3. определить рациональные параметры работы РПА и степень их влияния на выход горьких веществ хмеля; получить уравнения регрессии, описывающие процесс охмеления пивного сусла;
4. разработать математическую модель на основе кибернетического подхода, описывающую процесс получения хмелевого экстракта;
5. разработать новый способ охмеления пивного сусла, позволяющий сократить длительность стадии охмеления пивного сусла и нормы внесения хмеля;
6. провести опытно-промышленные испытания РПА в составе технологической линии по производству пива на стадии охмеления пивного сусла.

Объектом исследования являлся процесс охмеления пивного сусла с применением роторно-пульсационного аппарата.

Предмет исследования - взаимосвязь рациональных технических и технологических параметров РПА, влияющих на процесс охмеления пивного сусла.

Научная новизна. Научно обоснован способ охмеления пивного сусла с применением РПА, позволяющий сократить продолжительность технологической операции в 1,5 – 2 раза по сравнению с классическим способом, увеличить выход горьких веществ хмеля (изогумулонов) в 2,07 раза.

Получены уравнения регрессии, описывающие процесс выхода

изогумулонов хмеля в зависимости от переменных, представляющих собой рациональные технические и технологические параметры работы роторно-пульсационного аппарата.

Получена динамическая модель процесса охмеления пивного сусла на основе кибернетического подхода с применением структурно-параметрической идентификации, которая позволяет подобрать оптимальные физические параметры экстракции хмеля в РПА (зазор между ротором и статором, температура обрабатываемой среды, частота вращения ротора, время обработки) для обработки смеси пивного сусла или промывных вод с хмелем, позволяющих обеспечить наибольшую экстракцию изогумулонов хмеля.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы заключается в возможности оптимизации процесса охмеления пивного сусла за счет применения полученных уравнений на основе структурно-параметрической идентификации, математически описывающих процесс экстракции изогумулонов хмеля в РПА.

Практическая значимость работы состоит в:

- определении рациональных параметров работы РПА и степень их влияния на выход горьких веществ хмеля: зазор между ротором и статором 0,3 мм, температура обрабатываемой среды 85°C, частота вращения ротора 3000 мин⁻¹, время обработки 3 мин.

- разработке способа охмеления пивного сусла, защищенного патентом РФ № 2634870, позволяющего сократить продолжительность стадии охмеления пивного сусла и снизить нормы внесения хмеля.

- модернизации технологической линии производства пива с использованием в производственном цикле роторно-пульсационного аппарата.

Методология и методы исследования. Методология выполнения исследования включает теоретическую, экспериментальную и практическую направленность. Применялись следующие методы исследования: обзор и анализ существующих конструкций суслорочных аппаратов, роторно-пульсационных аппаратов, математическое моделирование на основе регрессионного анализа и кибернетического

подхода, апробация в условиях реального производства.

Положения, выносимые на защиту. Результаты экспериментальных исследований процесса получения хмелевого экстракта с помощью РПА; математическая модель процесса экстракции хмеля на основе пивного суслу и промывных вод, с применением структурно-параметрической идентификации; технология нового способа охмеления пивного суслу.

Степень достоверности и апробация результатов. Основные положения, рассматриваемой диссертации научно обоснованы, подтверждены метрологическим обеспечением определения экспериментальных результатов, применением стандартных методов физико-химического анализа, статистической обработкой массива данных и промышленной апробацией в условиях производства.

Материалы диссертации представлены и обсуждены на следующих конференциях и форумах регионального и международного уровня: Инновационный конвент «Кузбасс», Кемерово, 2016 г; IX Евразийский экономический форум молодежи, Екатеринбург, 2018 г; конкурс «Продовольственная безопасность»; II Международная научно-практическая конференция, Екатеринбург, 2018; Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Пищевые инновации и биотехнологии», Кемерово, 2016 г.

Текстовая часть диссертационной работы соответствуют паспорту научной специальности 05.18.12 – Процессы и аппараты пищевых производств по пунктам 1, 2, 3.

Структура и объем работы. Основное содержание диссертационной работы состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Основная часть диссертации изложена на 137 страницах. Содержит 68 рисунков, 10 таблиц. Список литературы включает 99 наименований.

ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА ОХМЕЛЕНИЯ ПИВНОГО СУСЛА И ЕГО АППАРАТУРНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

В данной главе представлена технологическая схема производства пива. Рассмотрены факторы, оказывающие влияние на процесс охмеления сусла. Приведены конструкции сусловарочных аппаратов и смежного оборудования, которые позволяют интенсифицировать процесс охмеления пивного сусла.

1.1 Анализ технологической схемы производства пива

Пиво представляет собой сложную много композиционную систему, включающую экстрактивные вещества солода, хмелевые вещества, придающие пиву характерную горечь и аромат, диоксид углерода [2, 3, 4]. Качество пива определяется по ГОСТ 31711-2012 Пиво. Основные технические условия.

Можно выделить основные факторы, влияющие на сорт пива: степень тепловой обработки солода, уровень горечи в хмеле, вид дрожжей для сбраживания пива. Комбинируя данные факторы в процессе технологического производства пива, можно создавать разные сорта пива, совершенствуя технологию его производства.

Технологическая линия производства пива представлена совокупностью важных этапов: подготовки пивного сусла, ферментирования сусла дрожжами, выдержки и осветления, карбонизации и розлива пива. Каждый этап подразумевает определенные последовательные аппаратурно-технические, биохимические и микробиологические операции [5, 6, 7,8].

Принципиальная технологическая схема производства пива приведена на рисунке 1.1. В ней определена последовательность технологических стадий и позиция, которую занимает охмеление пивного сусла. В этап приготовления пивного сусла входят очистка, измельчение солода и несоложенного сырья,



Рисунок 1.1 – Принципиальная технологическая схема производства пива

приготовление из них затора, фильтрование затора, кипячение сусла с хмелем, его фильтрование и охлаждение. Затем происходит сбраживание и дображивание пивного сусла, созревание молодого пива, фильтрование-

осветление и розлив готовой продукции [3, 9].

Очистка и измельчение зернопродуктов. Основным зернопродуктами в пивоварении являются: солод, несоложенный ячмень, пшеница. Очищенный солод подходит на дробление, где основная цель – упростить извлечение из сырья экстрактивных веществ. Дробление осуществляют с минимальными разрушениями оболочки зерна, т. к. их слишком мелкое дробление отрицательно сказывается на процессе фильтрования и качестве готового пива. Ячмень и другие несоложенные продукты обладают более твердой структурой и требуют дополнительного помола [10, 11, 12, 13].

Затем следует стадия затирания зернопродуктов с целью перевода растворенных веществ зерна в водный раствор. В этом процессе участвуют ферментативные вещества солода и комбинация различных температурных режимов. Затирание пивного суслу осуществляется в варочных агрегатах, в основном, двумя способами. Первый способ – настаивание, заключается в медленном нагревании суслу до 75°C , не доводя до кипения. Данный способ низкокзатратен и занимает мало времени, но для получения высокого выхода экстракта необходимо использовать высококачественное сырье.

Второй способ основан на кипячении некоторой части затора и смешивании с некипяченой частью затора. Температура отваривания не превышает 75°C . При данных параметрах происходит клейстеризация крахмала, чем обусловлен высокий выход экстракта. Отварочные способы подразделяются на одно-, двух- и трехотварочные, а также с кипячением густой части затора. Далее приведена схема одноотварочного способа приготовления пивного суслу. В первом котле для приготовления затора измельченный солод заливают водой со средней температурой 55°C . После достижения затором температуры в 50°C , его выдерживают 30 минут. При данной температуре наступает белковая пауза – расщепление пептидных связей между аминокислотами в белках. Затем $1/3$ густой части затора перемещают во вторую емкость, где производится процесс затирания: в течение 20 минут температура затора поддерживается 63°C , после повышают до 72°C . На температуре 72°C выдерживают 20 минут.

Далее затор переносят в первый котел и обе части затора смешивают. Температура устанавливается на отметке 62-63°C и затор выдерживается 20 минут. После нагревают содержимое котла до 70-72°C до полного осахаривания, в дальнейшем нагревают до 76-78°C и отправляют на фильтрацию.

Полнота процесса осахаривания проверяется пробой по йоду. Скорость нагрева затора соответствует 1°C в минуту [14, 15, 16, 17, 18].

После затирания начинается стадия фильтрования затора. Цель этапа – отделить жидкую часть затора от твердой части – перемолотых зерен. Разделение затора осуществляется на фильтрационных аппаратах, снабженных разрыхлительными механизмами или на фильтр-прессах. Процесс фильтрования состоит из двух ступеней: на первой происходит отделение первого сусла, а на второй горячей водой в нескольких повторностях вымывают задержавшийся экстракт из солодовых дробленых зерен. При фильтровании и промывании температура должна составлять 75-80°C. Продолжительность этого процесса с использованием современного фильтрационного оборудования составляет от 2 до 2,4 часа. Содержание первого сусла имеет значение от 15 до 17 % от общего объема. Промывные первые и вторые воды, где концентрация сухого вещества более 0,5% добавляется к первому суслу, а воды с меньшей концентрацией сухого вещества используются для дальнейших циклов затирания зернопродуктов. Ценным отходом пивоваренного производства является солодовая дробина, она используется как корм животным [9,19].

В процессе кипячения сусла с хмелем достигаются следующие основные цели: ароматизация сусла (за счет горьких и ароматических веществ хмеля), стабилизация состава (за счет инактивации ферментов), осветление сусла и повышение его коллоидной стойкости (за счет коагуляции белков), стерилизация и упаривание сусла.

В среднем, на процесс кипячения в сушварочном котле затрачивается от 1,5 до 2 часов. Объем добавленного хмеля обусловлен качественными характеристиками самого хмеля, а также типом и сортом пивной продукции. Хмель вносят в один или несколько приемов. Часть шишкового хмеля зачастую заменяют

хмельевыми препаратами [20,21]. Процесс кипячения завершается после измерения массовой доли сухих веществ в сусле, определения его цвета и консистенции. При кипячении в сусле дубильные вещества в комплексе с белками коагулируют в крупные хлопья [19,22].

Этап фильтрации проводят с целью осаждения из суспензии взвешенных твердых частиц. Осветление пивного сусла влияет на органолептический показатель – внешний вид готовой продукции, и проводится сепарированием.

В сепараторах происходит осаждение взвешенных частиц при воздействии на них центробежной силы. Эти аппараты обладают высокой энергоемкостью, поэтому вместо них часто применяют гидроциклонные аппараты, где отделение взвесей происходит под действием центробежной силы, которая создается благодаря тангенциальному вводу сусла в аппарат. Высокая температура способствует сохранению стерильности сусла. Продолжительность осветления в гидроциклонных аппаратах составляет 20-40 минут. Главным недостатком использования этих аппаратов является отсутствие систем контролируемого автоматического насыщения кислородом.

После отделения из сусла взвешенных частиц его охлаждают в пластинчатых теплообменниках. Данный тип теплообменников используется в виду их достаточного быстрого и эффективного охлаждения сусла. Затем охлажденное сусло отправляется на аэрацию.

Во время основного брожения сбраживается большее количество сахаров в сусле. После данного процесса получается молодое пиво - мутноватая жидкость со специфическим вкусом и ароматом. При брожении протекают биологические, биохимические и физико-химические процессы.

В настоящее время современные пивоваренные предприятия оснащены цилиндрическими бродильными аппаратами (ЦКБА), позволяющими проводить процессы главного брожения и дображивания в одном аппарате [39]. На практике применяют различную технологическую организацию этих процессов. В типичной схеме брожения и дображивания пива в ЦКБА главное брожение в аппарате протекает в течении 4-5 суток, по окончании которого происходит

осаждение и сьем дрожжей. Дрожжи, осевшие на дно аппарата, направляют в дрожжевое отделение. Превышающие нужное количество, дрожжи отправляют на подкорм животным, а также для создания ферментных препаратов [19]. Дображивание молодого пива осуществляется в течении 10 суток. При этом 2-3 раза производят сьем дрожжей [39]. В процессе дображивания происходит сбраживание оставшейся части экстракта, насыщение диоксидом углерода, осветление пива, улучшение его органолептических показателей. В это время происходят схожие процессы, что и при брожении, но медленнее. Необходимые органолептические характеристики пиво приобретает в результате окислительно-восстановительных реакций, благодаря которым исчезают вещества, придающие пиву неприятный, незрелый вкус и аромат.

Изучая технологическую схему приготовления пива можно сделать вывод, что стадия охмеления пивного сусла является одной из самых важных. На ней задаются основные органолептические показатели (горечь, аромат) влияющие на показатели конечного продукта. Таким образом, совершенствование технологического оборудования и производственных процессов, проходящих на стадии охмеления пивного сусла является важной задачей. В связи с этим будет актуально рассмотреть существующие способы охмеления, их достоинства и недостатки.

1.2 Существующие способы охмеления пивного сусла

В настоящее время очень часто можно встретить применение способов охмеления, которые использовались в пивоваренной промышленности СССР. Так, в одном из способов происходит кипячение сусла с шишками хмеля [29, 30]. Первостепенной целью охмеления сусла принято считать возможность получения пива высокого качества при минимальном расходе хмелевого продукта. Хмель является дорогостоящим компонентом в технологической цепочке для производства пива. Исходя из этого, важным условием становится гарантировать оптимальное извлечение горьких веществ из хмеля. Это позволяет снизить расход хмеля на стадии охмеления пивного сусла. В классическом методе охмеления пивного сусла сокращена продолжительность пребывания хмеля в сусле, что снижает потери изогумулонов. В сравнении с иными существующими методами, в традиционном хмель подается в общий объем сусла порционно. Хмель добавляется в кипящее сусло, в котором завершился процесс осаждения полипептидов и их коагуляция. Перед добавлением хмеля в сусло происходит мокрый помол хмеля для извлечения наибольшего количества горьких веществ. Такой помол дополнительно усиливает разрушение стенок хмеля. Однако, метод мокрого помола не совершенен, для хорошего выхода горьких веществ из хмеля требуется значительно большее количество потребляемой электроэнергии, чем при других способах.

Кроме того, широко применяются способы, основой которых является замена хмелевых продуктов CO_2 -экстрактом хмеля [31, 32, 33]. Эти способы являются перспективными, так как в значительной мере повышают выход изогумулонов [6]. Экстракт хмеля, насыщенный углекислым газом, имеет ряд преимуществ. Среди них однородность, стойкость, длительное поддержание свойств хмеля при хранении и получение партий пива со стабильным ощущением горьких веществ. Хмелевой экстракт, обогащенный углекислым

газом, также, как и классический хмель сочетает в себе молекулы ароматического ряда, эфирные масла и другие вещества.

Существует способ охмеления пивного сусла, исключая недостатки, ранее описанного способа. В котором хмелевой экстракт, насыщенный углекислым газом, смешивают с электроактивированной водой. Сусло кипятят, фильтруют и охлаждают [36]. Далее хмелевую эмульсию доводят до температуры кипения, для более полной изомеризации гумулонов, и вводят в уже остывшее сусло, перед его сбраживанием. Такие процессы улучшают качественные показатели готового пива. Повышается горечь пива, так как происходит более полная реализация изогумулонов из CO_2 -хмелевого экстракта. Электроактивированная вода – нововведение, позволяющее немного усилить аромат готового продукта и, соответственно, снизить расходы хмелевого сырья. Однако следует отметить, что при данном способе в пивное сусло, как и в предыдущем способе, не вводятся полифенольные соединения хмеля.

Разработан способ охмеления пивного сусла, предусматривающий введение хмелевых продуктов в три этапа с последующим совместным кипячением сусла и хмеля [34]. Метод основан на следующих операциях: через 20 минут после начала кипячения сусла к нему добавляют до 70% хмеля от общего рецептурного объема, суспензию кипятят от 1 до 2 часов, а за полчаса до окончания процесса добавляют следующую порцию хмеля – 20%. По окончании кипячения досыпают оставшиеся 10% хмелевого сырья. Недостатком данного способа является недостаточная крепость пива при хранении.

Существует способ, особенностью которого является кипячение пивного сусла посредством нагрева в гидроциклонном аппарате, внутри которого коаксиальным образом установлен кольцевой перколятор [37]. Во время кипячения сусла в аппарат подается хмель. Перемешивание осуществляется при помощи насоса в центральной части аппарата, насосом отбирается некоторый объем сусла, который возвращается обратно тангенциальным

подводом. Возвращенное в аппарат сусло делится на две струи, где одна направлена "вдоль" внутренней стенки корпуса гидроциклонного аппарата, другой поток подается по нижней части вдоль внутренней стенки перколятора. Этот поток возвращенного сусла подается с большей окружной скоростью, чем первый. Способ позволяет сократить примерно на 10 % время варки и исключает вероятность пригорания сусла на поверхности теплообмена.

Известен способ, предполагающий применение для охмеления дикорастущего северокавказского хмеля [38]. Перед закипанием в сусло вводится главная порция хмеля из расчета 500-600 г/гл. Следующая часть хмеля по массе от 26 до 48 г/гл. вводится в конце набора сусла. Финальная порция вводится уже в момент закипания по массе, равной второй порции. Рассмотренный способ обладает таким преимуществом, как достижение оптимального сочетания двух важных качеств готового продукта: улучшение органолептических характеристик пивного продукта и более полного перехода хмелевых веществ в сусло [37]. Недостатком способа является дефицитность хмеля, произрастающего только на определенной территории.

Анализируя приведенную информацию, можно сделать вывод, что основными недостатками рассматриваемых способов охмеления пивного сусла являются большая энергозатратность, сложность технологического процесса. Разработка нового способа охмеления пивного сусла, устраняющего основные вышеперечисленные недостатки, является важной и актуальной задачей.

1.3 Оборудование для охмеления пивного сусла

В современном пивоварении процесс охмеления проводят в сусловарочных аппаратах. В данном разделе представлено описание классического и двух современных сусловарочных аппаратов. В типовых сусловарочных аппаратах нагревание и кипячение сырья производится с помощью тепловой рубашки и внутреннего, либо наружного теплообменника. Классический сусловарочный котел устроен таким же образом, что и заторный

аппарат. Котел имеет большую площадь паровой рубашки с более сильной кривизной, что увеличивает интенсивность выпаривания сусла. В настоящее время внедряются герметичные сусловарочные котлы, которые функционируют при давлении, равном 0,02-0,03 МПа. При уваривании сусла под таким давлением возрастает способность к растворимости горьких веществ хмеля, сохраняя его аромат. Это также позволяет снизить расход применяемого сырья [39, 40, 41, 42, 43, 44, 45].

На смену классическим сусловарочным аппаратам пришли современные модели с внутренним нагревательным элементом [19, 20, 21, 51]. Новейшие сусловарочные котлы оборудованы кожухотрубным теплообменником. Кожух перколятора заполняется греющим паром, а трубы заполняются суслом. Сусло в трубках теплообменника циркулирует посредством разности плотностей и градиента температуры сусла в разных областях сусловарочного аппарата.

В современном сусловарочном котле с внутренним перколятором (рисунок 1.2) на опоре 15 фиксируется корпус 1, имеющий круглое сечение. Корпус аппарата сверху оборудован приваренной крышкой 8, а снизу днищем 14. В нижней части днища оборудовано углубление – чаша для слива 16. Соприкасающиеся с заторможенные элементы аппарата, изготавливаются из нержавеющей стали.

Основная цилиндрическая часть корпуса имеет габариты, соотносящиеся как 1:(1,5-2,0), соответственно, высота и диаметр. Коэффициент заполняемости сусловарочного котла составляет приблизительно 0,75. Крышка аппарата представляет собой конус, основание которого расположено под углом 25°. К крышке, в кольцеобразный желоб 5, подводится и закрепляется вертикальная вытяжная трубка 6. Кольцеобразный желоб служит сборником конденсата вторичного пара и выводит наружу конденсат по конденсатопроводу 4.

Люк 3, диаметром до 60 см, расположен на конической крышке сусловарочного аппарата и оснащен системой электрической блокировки. Лестница 2 из нержавеющей стали служит приспособлением для своевременного обслуживания и обработки внутреннего устройства аппарата для соответствия санитарно-гигиеническим требованиям. Для осуществления более равномерного

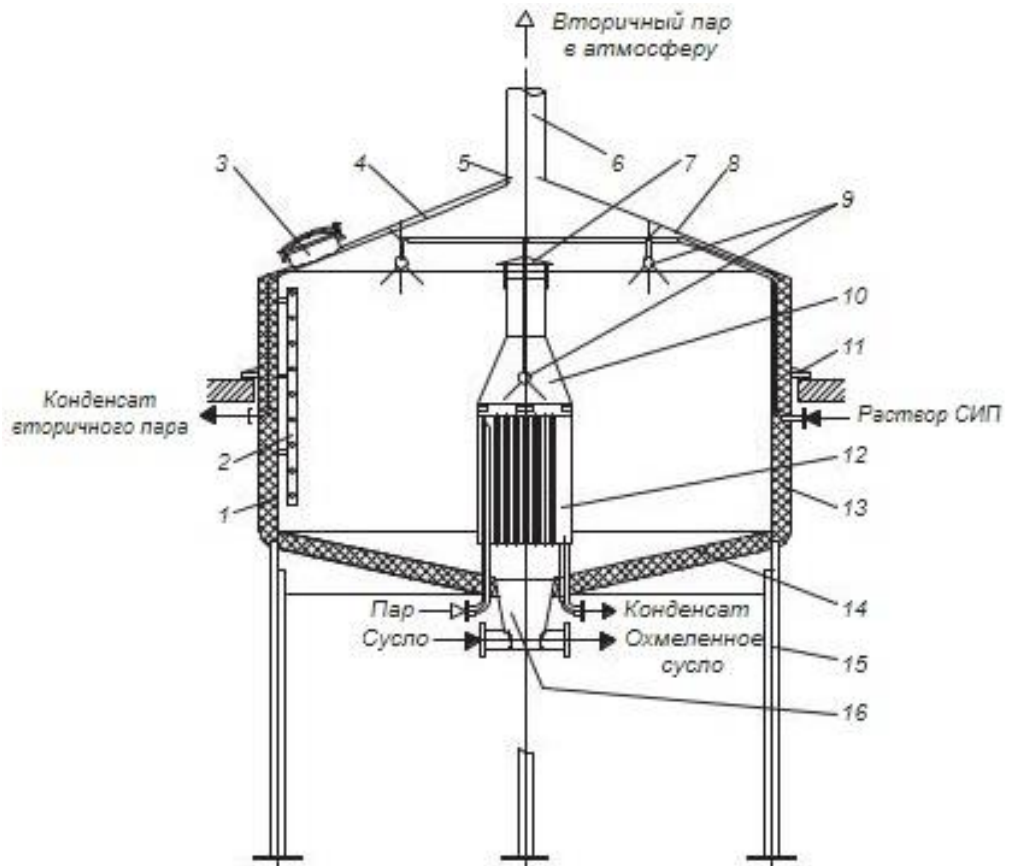


Рисунок 1.2 -Сусловарочный аппарат с внутренним нагревателем

1 - корпус; 2 - лестница; 3 - люк; 4 - конденсатопровод; 5 - желоб кольцевой; 6 - вытяжная труба; 7 - колпак отбойный; 8 - крышка; 9 - моющая головка; 10 - конический диффузор; 11 - кольцо декоративное; 12 - теплообменник (перколятор); 13 - теплоизоляция; 14 - днище; 15 - опора; 16 - чаша сливная

нагрева сусла цилиндрическую часть корпуса и днища теплоизолируют и поверх теплоизоляционного слоя 13 накладывают декоративную облицовку. Декоративное кольцо 11 скрепляют сваркой с облицовкой на уровне перекрытия. Наружняя поверхность аппарата подвергают либо обязательной стеклобисерной струйчатой обработке, либо полированию. Внутри диффузора 10 в аппарате размещаются моющие головки 9, имеющие шарообразную форму, через них под давлением в 0,25 МПа подаются моющие растворы. Моющие головки образуют автоматизированную систему промывания. Внутри, аппарат оборудован кожухотрубчатый теплообменником 12, где сусло движется по его трубам, а в межтрубном пространстве проходит нагретый пар под давлением около 0,3 МПа.

Три опоры трубчатого вида, на которых закрепляется перколятор, в то же время служат трубопроводами, подводящими в межтрубное пространство греющий пар и отводящими из него конденсата.

На теплообменнике, по периметру верхней трубной решетки держится диффузор конической формы. Его работа заключается в том, чтобы сузить потоки пивного суслу, которое выходит из труб перколятора. Это сказывается на увеличении скорости потока и снижении давления струи суслу.

Над поверхностью конического диффузора прикреплен колпак отбойный 7. Он распределяет в верхней части сусловарочного оборудования поток пивного суслу, которое при разности температур, выходит из перколятора при циркуляции.

Можно выделить такие основные преимущества аппарата с внутренним перколятором, как объединение нагревателя и варочного котла, соответственно, цех для варки суслу может занимать либо меньшую площадь, либо не загромождаться дополнительным оборудованием. При работе используется вся площадь поверхности перколятора (а также наружная стенка межтрубного пространства), таким образом создаются delicate гидродинамические и термические условия для естественной циркуляции пивного суслу. Под delicate условиями подразумевается недопускание термоизлучения, работа при достаточно низком давлении греющего пара, а также использование меньшей поверхности изоляции. В таких сусловарочных моделях допускается возможность применения компрессии термического или механического характера. Системы с внутренним нагревателем для варки суслу требуют меньшее количество инвестиций и затрат на эксплуатацию. Применение в аппарате такой технологии менее энергозатратно и не требует постоянного технического обслуживания.

Недостатками классических сусловарочных котлов с внутренним нагревателем считают следующие. Вместимость внутреннего пространства аппарата уменьшается за счет нагревательного элемента, что влечет за собой снижения коэффициента заполнения. Уменьшение коэффициента заполнения сусловарочных систем нарушает технологическую гибкость оборудования. Площадь поверхности нагревателя ограничивается размерами цилиндрического корпуса аппарата. Перколятор, в свою

очередь, менее устойчив к загрязнениям, вызванным нарушениям условий варки сусла. Внутренние стенки труб, по которым циркулирует сусло зачастую загрязняются пригорелыми остатками. А труднодоступные зоны аппарата усложняет организацию проведения санитарной и гигиенической обработки. У традиционных моделей в трубах перколятора на этапе нагрева осуществляется неравномерная, импульсивная циркуляция сусла. Теплообмен конвективным способом совершается малоэффективно и имеет большой диапазон колебаний значения коэффициента теплопередачи, что ухудшает качество готового продукта. Сусло на начальном этапе нагревания расслаивается по разности температур. Температурный режим выравнивается лишь через 20 минут после начала работы, следовательно, стадия закипания начинается позже. Период высоко результативной работы суслотварочной системы составляет не более 8 циклов.

Непостоянность поддержания температуры в аппарате влияет на физико-химические показатели пивного сусла. Нагрев верхних слоев сусла, и как следствие, более быстрый их переход на стадию кипячения ведет к раннему уменьшению количества скоагулированного азота. Это вещество способствует увеличению пенообразования. Медленный нагрев нижних слоев пивного сусла сказывается на торможении процесса изомеризации гумулонов в хмеле. Выявленные выше недостатки суслотварочных аппаратов убраны в аппарате с системой Ecoterm, в котором применено более современная конструкция внутреннего нагревателя [39]. Суслотварочный аппарат с системой Ecoterm, (рисунок 1.3) позволяет убрать неприятные технологические воздействия, что оказывает положительное влияние на параметры сусла необходимые на этапе кипячения с хмелем. Основными отличиями системы Ecoterm принято считать наличие двух систем циркулирования сусла, а также системой перемены температурного режима нагретого пара. Благодаря этому данная система дает возможность перерабатывать в бережных условиях пивное сусло с хмелем.

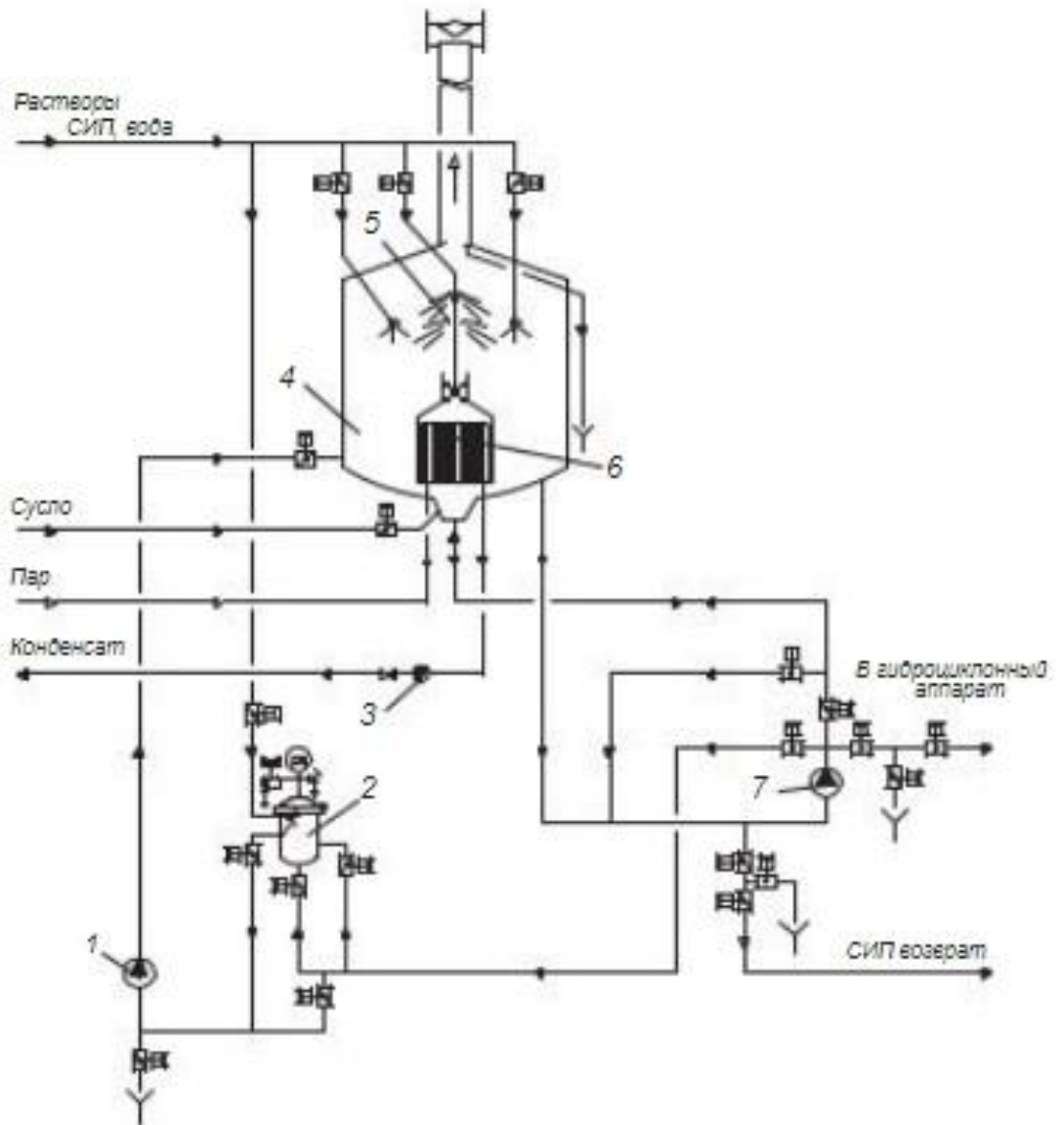


Рисунок 1.3-Функциональная схема сушеварочной системы Ecoterm

1 – насос для внесения хмеля; сборник хмеля; 3 – конденсатоотводчик; 4 – корпус аппарата; 5 – двойной отражатель; 6 – теплообменник внутренний; 7 – насос сушеварочный

После рассмотрения классической и современных конструкций сушеварочных аппаратов, а также оценив их достоинства и недостатки, следует рассмотреть возможные дополнительные единицы оборудования для совершенствования процесса охмеления пивного сусла. К такому оборудованию можно отнести современные роторно-пульсационные аппараты. Они позволят значительно ускорить стадию охмеления пивного сусла, позволят более рационально применять производственное сырье – гранулированный хмель.

1.4 Конструкции роторно-пульсационных аппаратов

В настоящее время для производства качественного продукта требуются большие затраты энергии, сырья. С целью совершенствования процесса охмеления проводится постоянная работа и одним из вариантов развития в этой сфере, будет уменьшение нормы внесения хмеля благодаря применению вспомогательного оборудования, что позволит повысить выход горьких веществ.

Для сокращения большого количества сложно-контролируемых технологических приемов можно использовать современное технологическое оборудование. Возможным решением данной проблемы может стать применение роторно-пульсационного аппарата.

Роторно-пульсационный аппарат (РПА), который применим для диспергирования в процессе измельчения, гомогенизации и перемешивания получаемых смесей и может быть использован в производстве пива на стадии охмеления. Позволяет сократить по времени процесс охмеления по сравнению с суслотарочными аппаратами, увеличит выход экстракта из хмеля, следовательно, улучшит экономические показатели на затраты сырья, тем, что при меньшей массе хмеля получится сусло с необходимой экстрактивностью. Также отмечается, что в сравнении с суслотарочными аппаратами РПА обладает меньшей металлоемкостью и потребляет меньшее количество электроэнергии [48, 49, 50, 51, 52, 53, 54] Благодаря сочетанию воздействий, которые осуществляются в РПА, меняются свойства получаемых продуктов, уменьшаются энергозатраты из-за усовершенствования процессов [55, 56, 57, 58, 59].

Главной конструктивной особенностью РПА считается присутствие поочередно зафиксированного и делающего обороты коаксиально сделанных рабочих частей с отверстиями, сквозь которые попадает перерабатываемый продукт.

Аппараты, в которых происходит поэтапное внесение ингредиентов изображен на рисунке 1.4 [60]. Данная конструкция состоит из корпуса и крышки, а ротор и статор имеют исполнение соосно выполненных колец. Они

обладают зубьями конической формы. Введение продукта проходит сквозь загрузочные патрубки. Два круга, обладают насечками по всему диаметру, крепятся жестко к валу РПА и соединение между собой происходит за счет лопаток. В центре ротора располагается рабочая камера. Основным минусом считается сложность изделия и большие затраты энергоресурсов.

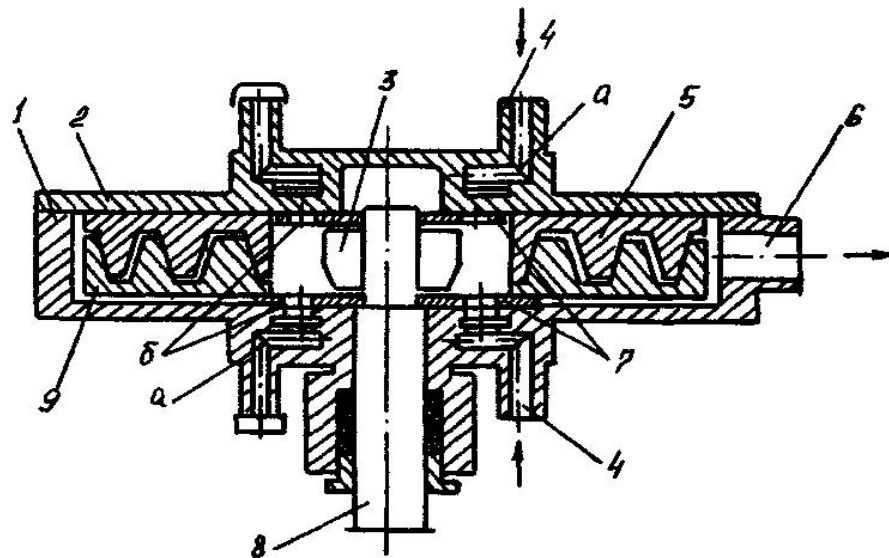


Рисунок 1.4 – роторно-пульсационный аппарат с поэтапным введением компонентов

1 – корпус; 2 – крышка; 3 – лопасти; 4 - загрузочные штуцеры; 5 – статор;
 б – разгрузочный штуцер; 7 – диски; 8 – приводной вал; 9 – ротор; а, б – патрубки ввода
 смешиваемых компонентов

Для измельчения и смешивания компонентов может быть применен РПА с меняющимся межцилиндровым зазором, который изображен на рисунке 1.5 [61]. Зубцы ротора и статора сделаны под углом и обладают противоположным наклоном. Регулировка межцилиндрового зазора позволяет выполнять разные технологические операции. Достоинством такого РПА является увеличенная скорость процесса. Данная конструкция обладает теми же недостатками, что и предыдущая модель.

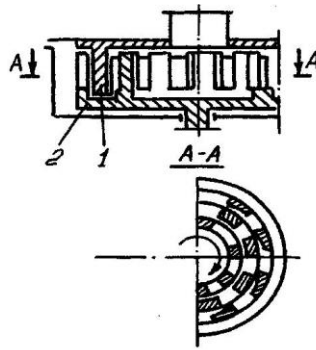


Рисунок 1.5 – РПА для смешения и диспергирования

1 – ротор, 2 – статор

Существуют модели РПА с двухсторонним ротором. Подобная модель представлена на рисунке 1.6. В основе изобретения лежит задача интенсификации процессов диспергирования, гомогенизации и эмульгирования дополнительными гидродинамическими воздействиями на обрабатываемый материал.

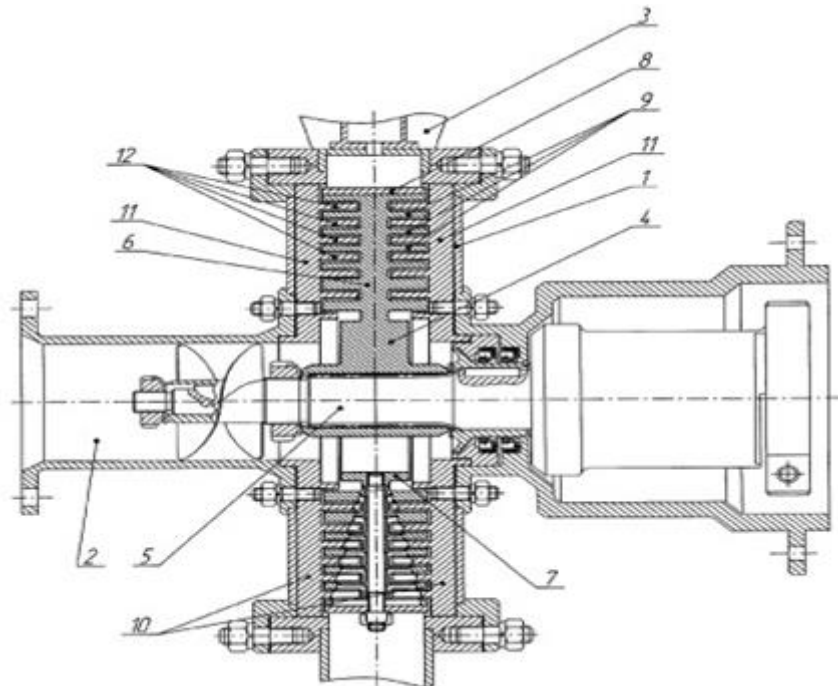


Рисунок 1.6 – РПА с двухсторонним ротором

1 - патрубок входа; 2 - патрубок выхода; 3 - двухсторонний ротор; 4 - приводной вал;
 5 - диск ротора; 6 - ступица ротора; 7 - обод ротора; 8 - кольцевые цилиндрические элементы ротора;
 9 - двухсторонний статор; 10 - диски статора; 11 - кольцевые цилиндрические элементы статора;
 12 - радиальные каналы

Данный РПА реализует необходимый транзит перерабатываемого продукта, осуществляя процесс образования пузырьков с дальнейшим их взрывом, благодаря взаимодействию волновых импульсов, падающих на диски. Аппарат служит дополнительным источником акустических колебаний, позволяет менять достаточно широко акустические эффекты от дисков конструкции во время действия РПА.

На следующем рисунке 1.7 изображена принципиальная схема роторно-пульсационного аппарата. Он осуществляет действие по следующему принципу. Электродвигатель 1 через муфту 6, горизонтальный вал 3 и винтовую передачу 5 приводит в движение ротор 11, находящийся на валу 4. Переработанная смесь продуктов попадает через входной патрубок 8 в центр ротора, после чего из-за воздействия центробежных сил отправляется в конусообразный зазор между ротором и статором. Затем на смесь действуют механические колебания, созданные в аппарате.

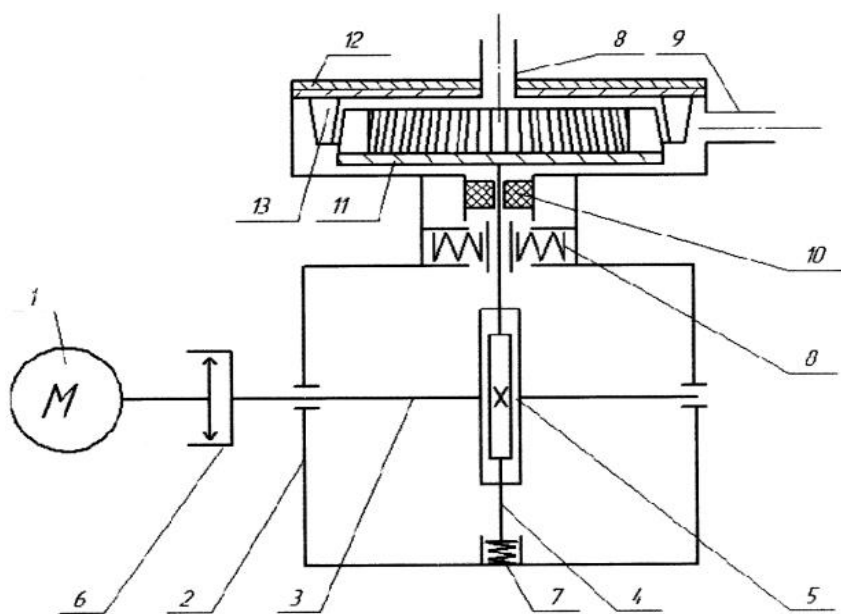


Рисунок 1.7 – РПА для получения стабильных дисперсных систем с жидкой фазой
 1 – электродвигатель; 2 – корпус; 3 – горизонтальный вал; 4 – вертикальный вал; 5 – винтовая передача;
 6 – фрикционная муфта; 7 – основание; 8 – входной патрубок; 9 – выходной патрубок; 10 – ступица
 ротора; 11 – ротор; 12 – статор

Во время вращения ротора осуществляется временное совмещение и перекрытие расположенных по радиусу каналов ротора с каналами статора, из-за чего появляются гидравлические удары, развивающие кавитацию. В итоге данного действия переработанная смесь испытывает мощные гидродинамические и акустические удары. Таким образом, предложенное устройство позволяет осуществить и интенсифицировать разные процессы, где содержатся пищевые волокна. К ним относятся: гомогенизация, диспергирование и эмульгирование в дисперсных системах с жидкой фазой.

Существует роторно-пульсационный аппарат [62], который в основном создан для дисперсных систем «жидкость – жидкость». Данный аппарат (рисунок 1.8) позволяет повысить однородность получаемой среды, сохраняя при этом ее высокую дисперсность.

В этой конструкции высокая степень дисперсности была достигнута повышением относительных скоростей взаимодействующих компонентов. Такой эффект в конструкции достигается благодаря специальной форме ротора и статора, а также выпукло-вогнутости крышки.

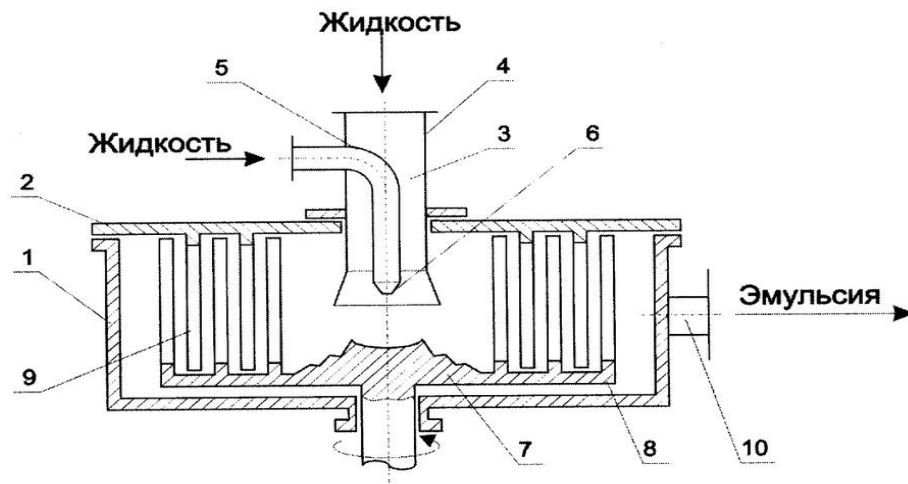


Рисунок 1.8 – РПА с ротором в форме усеченного конуса

- 1 -цилиндрическая рабочая камера; 2 – крышка; 3 –устройство для ввода; 4 - центральный патрубок;
5 – канал; 6 – сопло; 7 –ротор; 8 - три коаксиальных цилиндра; 9 - два цилиндра статора;
10 - тангенциальный патрубок

Дополнительное диспергирование компонента происходит из-за щелевых канавок на центральной части ротора. В результате появляются условия для создания высокой степени дисперсности смеси при высокой ее однородности.

Одним из наиболее близких аппаратов в сравнении с примененным в данной работе считается РПА, обладающий направленными лопастями [63, 64]. Аппарат изображен на рисунке 1.9.

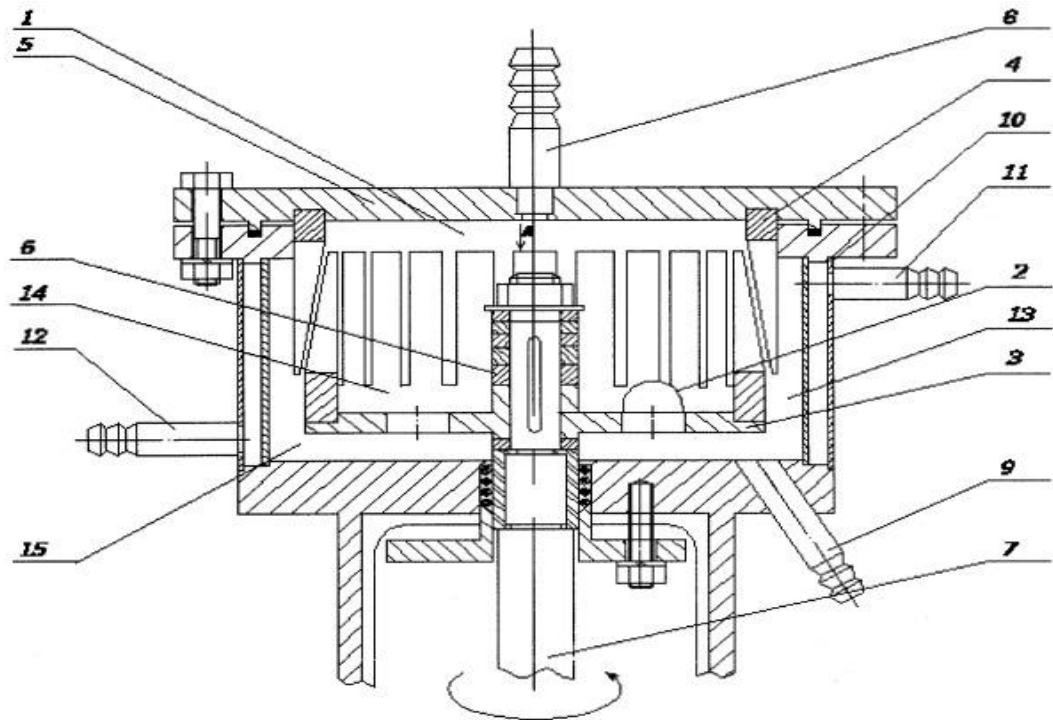


Рисунок 1.9 – РПА с направляющими лопастями

- 1 – корпус; 2 - лопасти полусферической формы; 3 - отверстия ротора; 4 - статор с прорезями; 5 – крышка; 6 - набор регулировочных шайб; 7 – вал; 8 – входные патрубки; 9 – выходные патрубки; 10 – тепловая рубашка; 11 - входной патрубок; 12 - выходной патрубок; 13 - рабочая зона; 14 - нижняя часть рабочей зоны; 15 - внешняя полость аппарата

Лопатки, расположенные на днище ротора, необходимы для регулирования масс жидкостей во время движения. Смесь, проходя в РПА через патрубок для ввода 8 делится на два потока. Один поток стремится к стенкам корпуса из-за действующих на него центробежных сил и обращается сквозь зубья ротора и статора. Другой поток, за счет захвата лопастями направляется в углубления у основания ротора, а потом

переходит во внешнюю рабочую зону РПА 15. Смесь из полости снова делится на два потока. Одна направляется к выходному патрубку 9, а вторая, под действием насосного эффекта, направляется в рабочую область РПА 13.

Проводимые исследования продемонстрировали, что увеличение частоты вращения ротора повышают циркуляцию потока смеси за счет установки у основания ротора лопастей. Данного явления не обнаруживалось в ранних конструкциях аппаратов.

Особенности данной конструкции аппарата позволяют повысить качество готового продукта и ускорить технологический процесс, благодаря сокращению времени пребывания смеси в РПА.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1

1. Проанализированы достоинства и недостатки современных способов охмеления. Основными достоинствами являются: хорошие показатели коагуляции и осаждения белковых веществ, экстрагирование хмелевых эфирных масел и полифенолов в сусло. К существующим недостаткам можно отнести: чрезмерное вспенивание сусла при кипячении, повышенная цветность сусла, снижение вкусовой стабильности готового пива, высокий расход хмеля, высокая энергозатратность и длительность проведения процесса. Таким образом, возникает необходимость разработки нового способа охмеления пивного сусла, исключающего данные недостатки

2. Обзор известного оборудования для охмеления пивного сусла показал перспективность применения РПА для интенсификации процесса охмеления. Конструкции этих аппаратов позволяют добиться однородности смешения хмеля с пивным суслом и промывными водами, ускоряют протекание процессов экстрагирования изогумулонов за счет генерирования в них гидромеханической кавитации и упругих колебаний. К основным достоинствам РПА относятся: энергоэффективность, малогабаритность.

ГЛАВА 2. АППАРАТУРНОЕ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1 Методики проведения экспериментальных исследований и обзор опытно-исследовательского стенда

Проведение экспериментальных исследований было осуществлено на опытно-исследовательском стенде, который представлен на рисунке 2.1. В основу стенда «А» входят следующие элементы: роторно-пульсационный аппарат 1, электродвигатель постоянного тока 2 модель 2 ПН 112 L У МП4, который при высокоэффективном режиме работы потребляет 5,3 кВт для обеспечения частоты вращения вала от 1000 до 3000 мин⁻¹. Клиноременная передача 3 имеет передаточное число 1,47. В позицию Б входят контрольные и измерительные приборы. Пульт 4 содержит амперметр 5, вольтметр 6, тахометр ТЭ 30 5 Р позиция 7 для показаний частоты вращения ротора. На РПА установлен термометр 8 для осуществления температурного контроля. Лабораторный автотрансформатор регулируемый 9 модель АОСН-20-220-75 У 4 предназначен для поддержания на нужных значениях частоты вращения вала. Для нагрева и поддержания температуры в аппарате применялся универсальный водный термостат ВWT-U, связанный с тепловой рубашкой роторно-пульсационного аппарата.

Конструкция РПА 1, представлена на рисунке 2.2 и была разработана в КемГИПП, защищена несколькими патентами [65]. Основными элементами РПА считается ротор и два статора – внешний и внутренний. Сопрягаемые поверхности ротора и статора выполнены коническими. Зазор между ними регулируется с помощью регулировочных шайб.

Колебания низких частот являются наиболее эффективными для процесса диспергирования [63].

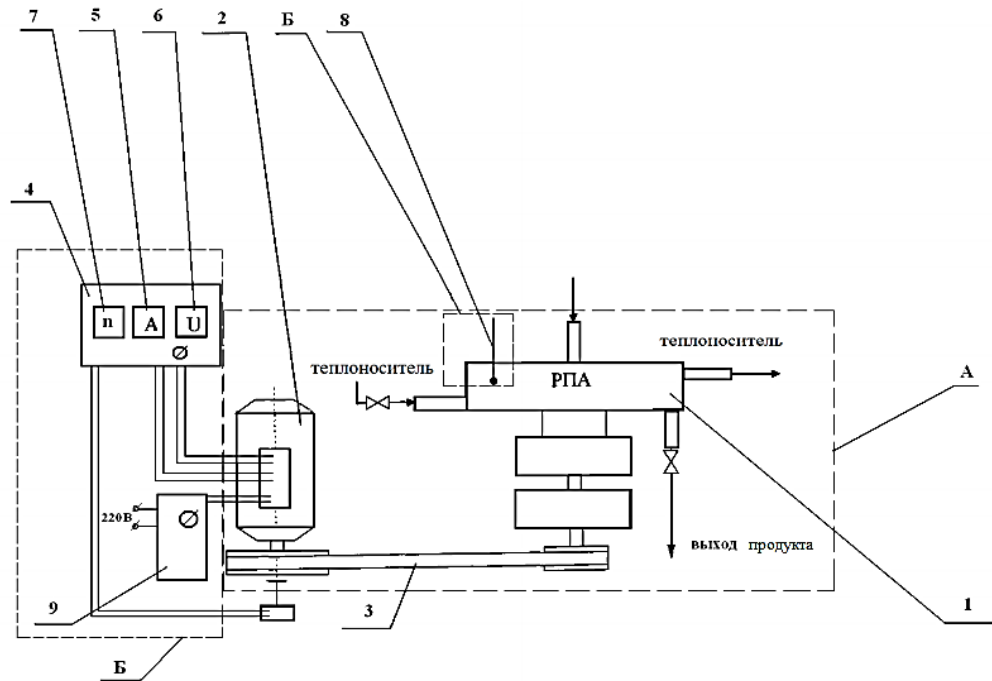


Рисунок 2.1 - Опытно-исследовательский стенд

А – основа стенда; Б – контрольные измерительные приборы;

1 – роторно – пульсационный аппарат; 2 – электродвигатель постоянного тока;

3 – клиноременная передача; 4 – пульт; 5 – амперметр; 6 – вольтметр; 7 – электронный тахометр;

8 – термометр; 9 - ЛАТР

В радиальном зазоре роторно-пульсационного аппарата на поддержание потока турбулентного течения оказывают влияние срезающие и сдвигающие усилия. Рециркуляция среды внутри аппарата осуществляется благодаря отверстиям 14 на ступице ротора. Такая многократная обработка сусла с хмелем повышает эффективность работы РПА. Экстрагированное сусло выводится из аппарата при помощи штуцера 4.

Конструкция РПА обладает тепловой рубашкой 16 со штуцерами для входа 5 и выхода хладагента 6. Она служит для сохранения требуемой температуры. Техническая характеристика стенда аппарата обладает: производительностью – 0,100 л/ч, объемом рабочей зоны аппарата – $1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$, передаточное число клиноременной передачи – 1,47, частота вращения ротора – 1000 - 3000 мин^{-1} , зазор между ротором и статором – 0,1 - 0,5 мм.

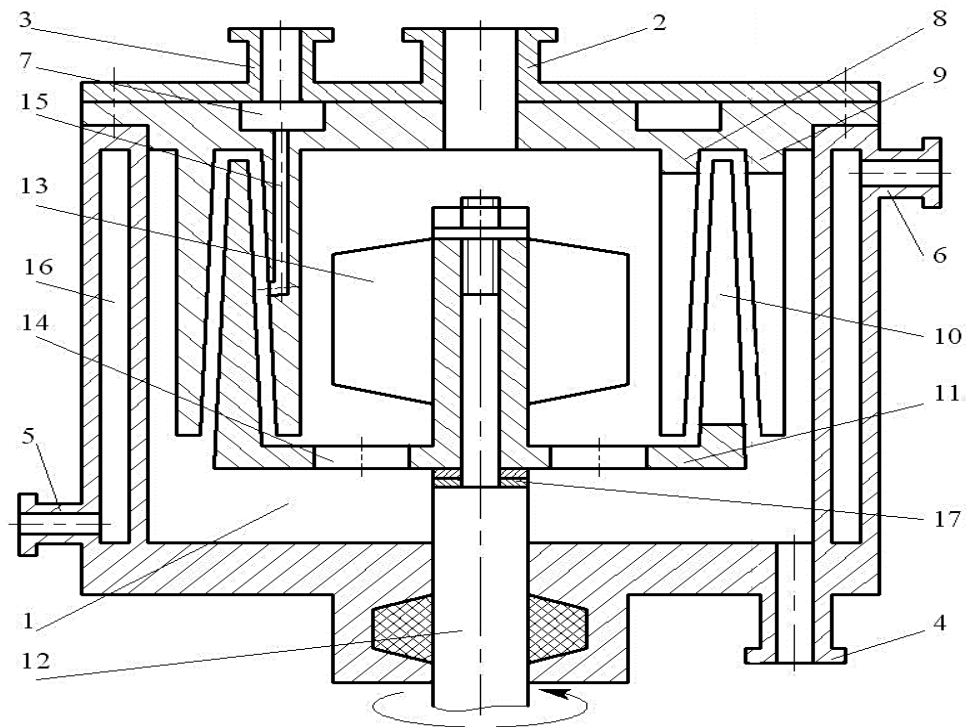


Рисунок 2.2 - Роторно-пульсационный аппарат

1 – рабочая полость; 2 – штуцер входа свежей реакционной массы; 3 - штуцер входа смеси; 4 - штуцер выхода смеси; 5, 6 - штуцера входа и выхода хладоносителя; 7 – газовая камера; 8 – венцы статора внутренний; 9 - венцы статора наружный; 10 - венцы ротора; 11 – ступица ротора; 12 – вал; 13 – лопасти; 14 – отверстия в ступице ротора; 15 – каналы в зубьях статора; 16 – рубашка; 17 – регулировочные шайбы

РПА для создания хмелевого экстракта совершает работу следующим образом. Через входной патрубок 2 подаются компоненты жидкой и твердой фаз в рабочую область 1, где под действием центробежных сил материальный поток движется через венцы ротора 10 и статора 8. На суспензию, состоящую из гранулированного хмеля и неохмеленного пивного сусла, оказывается сильная измельчающая нагрузка. Затем во внешней рабочей области аппарата, поток, направляется в нижнюю часть аппарата, и благодаря насосному эффекту проходит через отверстия в ступице ротора. Использование РПА на стадии охмеления сусла позволит добиться следующих эффектов.

1. В результате перекрытия пазов ротора и статора появляются чередующиеся зоны сжимания и расширения. За счет расширения в жидкой фазе появляются области разрыва сусла – кавитационные зоны. Кавитационные пузырьки схлопываются с силой

около 10 МПа, вследствие чего возникают ударные волны. Данное воздействие приводит к интенсивному диспергированию хмеля и увеличивает поверхность взаимодействия фаз.

2. Благодаря механическим воздействиям РПА на твердую фазу за счет срезающих и истирающих нагрузок, а также развитой турбулентности, пульсациям давления и скорости потока жидкости улучшается растворимость компонентов гранулированного хмеля. Данные воздействия приводят к интенсивному взаимодействию пивного суслу с гранулированным хмелем.

3. Интенсивное колебание частиц хмеля в местах трения приводит к повышению температуры суслу, что в свою очередь влияет на увеличение коэффициента внутренней диффузии. Это позволит равномерно распределить компоненты смеси и улучшит их взаимодействие.

Для достоверного исследования процесса охмеления пивного суслу был проведен полнофакторный эксперимент (ПФЭ) [66, 67], заключающийся в обработке суспензий в РПА, состоящих из гранулированного хмеля и неохмеленного пивного суслу, а также гранулированного хмеля и промывных вод. Факторы эксперимента по уровням представлены в таблице 2.1.

Ход эксперимента проходил следующим образом:

1. Задавались параметры роторно-пульсационного аппарата согласно матрице планирования.

2. Проверялась система измерений и герметичность соединений.

3. Проводился пробный запуск электродвигателя.

4. При помощи вентиля на корпусе аппарата 7 осуществлялась настройка производительности.

5. После установившегося режима (1-2 мин), во время которого аппарат работал без суспензии, а только с водой, производился контроль температуры обрабатываемой среды.

6. В аппарат загружался экстрагент в количестве 0,8 л. и гранулированный хмель массой 0,024 кг. Проводилась обработка суспензии при установленных параметрах. В это же время происходило кипячение пивного суслу, объемом 2,2 л. После закипания

пивного суслу в него добавлялось 0,4 л. экстракта из РПА. Затем осуществлялось совместное кипячение в течение 1 часа. Последние 0,4 л. экстракта хмеля добавляли за 30 минут до окончания кипячения.

7. В полученных пробах охмеленного пивного суслу определялись химические показатели: изогумулон, полифенолы, высокомолекулярная фракция белка А.

Таблица 2.1 - Значение факторов экспериментов по уровням

Уровень	Температура обрабатываемой среды t, °C	Частота вращения ротора n, мин ⁻¹	Зазор между ротором и статором s, мм	Время обработки τ, мин
низший	55	2000	0,1	1
нулевой	70	2500	0,3	2
верхний	85	3000	0,5	3

Экспериментальные исследования проводились согласно матрице планирования, которая представлена в приложении А.

2.2 Характеристики материалов, применяемых в экспериментальных исследованиях

Хмель (*Humulus lupulus*) – это растение порядка крапивоцветные из семейства коноплёвых. Хмель является многолетним вьющимся и двудомным. Женские соцветия обогащены горькими смолами и эфирными маслами, их применяют в пивоваренной отрасли [68, 69]. Эти компоненты придают готовому пиву горечь и аромат.

При оценке качества хмеля учитываются важные химические показатели, а также внешний вид и строение его шишек. Химический состав хмеля оказывает влияние на качественные показатели производимого с его применением пива [70]. Хмель в сухом виде содержит: горьких веществ около 18,5%; хмелевого масла, примерно, 0,5 %, дубильных веществ, в среднем, 3,5 %; белка до 20 %, минеральных веществ порядка 8 %.

Оставшееся количество веществ занимает целлюлоза и другие соединения, которым не придают особого внимания при производстве пива. На ранних стадиях роста хмеля, в его клетках, вырабатываются β -кислоты. Они образуются в прицветничке в лупулиновых железах и обладают малой горечью. При дальнейшем созревании в части из этих кислот функциональная группа (-ОН) переносится, образуются α -кислоты (гумулоны), которые превосходят первые по горечи в 9 раз.

Важнейшими химическими соединениями в образовании горечи для пива считаются гумулоновые вещества, кроме когумулона. Ему приписывают отрицательную роль в образовании горечи пива, так как это вещество при изомеризации придает пиву резкую и грубую горечь. Концентрация когумулона в хмеле должна составлять менее 20-25% от общего количества гумулонов [3, 6, 7, 8, 9, 4, 11, 12, 13, 71, 72]. При выращивании, хмелевые растения с низким содержанием когумулона ценятся выше. Эта характеристика является основополагающей при определении сорта хмеля.

Образованные гумулоны не растворяются в воде. Для проведения процесса экстрагирования этих веществ необходима их изомеризация. Осуществляют ее кипячением хмеля с суслем. α -кислоты переходят в хорошо растворимые изо- α -кислоты. На стадиях охлаждения и брожения сусла, пренебрегая осаждением, изо- α -кислоты переходят в готовый продукт. Горькие поверхностно активные хмелевые вещества повышают и поддерживают пеностойкость. Соответственно, более горькое пиво обладает лучшей стойкостью пены. Пиво проходит обязательную стадию стерилизации, а изогумулоны дополнительно замедляют процесс развития в пиве микрофлоры. Так как мембраны лупулиновых желез проницаемы для молекул кислорода, α -кислоты после образования начинают медленно распадаться.

При хранении хмеля под действием кислорода, измененного температурного режима и повышенной влажности воздуха, гумулоны распадаются с большей скоростью. Например, при хранении хмеля в температурном диапазоне 18-20°C за 60 дней расщепляется 25% гумулоновых веществ. Для более эффективного сохранения ценности, хмелевые шишки до

обработки хранят в герметичных светонепроницаемых пакетах из четырехслойной фольги в сухих и прохладных условиях.

Химическое преобразование α - и β -кислот завершается при образовании твердых смол, которые не значимы для пивоваренной отрасли. С твердыми смолами выделяется и валериановая кислота, придающая долго хранящемуся хмелю, типичный сырнй запах.

Горькие вещества обладают различной горечью. α -кислоты по горечи превосходят β -фракции кислот. Основной составляющей, определяющей качество и товарную ценность, конкурентоспособность хмеля, являются α -кислоты. В последнее время, по всему миру производители пива отводят большее внимание селекции ценных сортов хмеля с высоким содержанием гумулонов. На сегодняшний день, на рынке хмеля поступают сорта с высокой концентрацией α -кислот, например, сорт Hallertaur Magnum.

Характеристика гранулированного хмеля сорта Магнум (Hallertaur Magnum, Joh. Barth and Sohn, Германия):

содержание α -кислоты – 13,1%;

содержание β -кислоты – 6%;

содержание влаги – 7,5%;

упаковка – вакуумная, с массой продукта 100 гр.;

Для данных экспериментальных исследований использовалось пивное сусло 11% плотности, а также первые и последние промывные воды, гранулированный горький хмель «Magnum» для приготовления хмелевого экстракта.

В качестве экстрагента были выбраны:

- неохмеленное пивное сусло;
- промывные воды (первые и последние).

Неохмеленное пивное сусло используется на стадии кипячения сусла с хмелем. Промывные воды получают при промывании дробины.

Для исследования использовалось пивное сусло для приготовления светлого пива «Жигулевское» (ООО «Торговый дом «Золотая Сова», г. Кемерово).

2.3 Методы определения химических показателей пивного сусла

Плотность сред определялась опытным путем с помощью анализатора Колос [89] и составила: ρ (пивное сусло) = 1,0442 кг/м³; ρ (промывные воды) = 1,0060 кг/м³.

Методика определения горьких веществ хмеля. Изогумулон – основной компонент горьких веществ охмеленного сусла, образующийся при изомеризации гумулона хмеля. Содержание изогумулонов подсчитывают для точного нормирования внесения хмеля и контроля режима охмеления [71]. Метод определения изогумулона в сусле основан на экстракции его из сусла изооктаном и определении оптической плотности изооктанового экстракта [15,72, 73].

Сусло освобождают от взвешенных частиц центрифугированием. Пипеткой набирают 10 см³ отфильтрованного неохмеленного сусла и вносят в стеклянную колбу. Затем наливают в нее 1 см³ 3н. раствора соляной кислоты и 20 см³ изооктана, закрывают цилиндр пробкой и встряхивают колбу в течении 30 с. Колбу оставляют в покое для разделения слоев жидкости. После отстаивания пипеткой осторожно отбирают часть прозрачного верхнего слоя и переносят в кювету, не доливая ее примерно на 10 мм до верхнего края. В другую кювету наливают чистый изооктан, кюветы помещают в спектрофотометр и определяют оптическую плотность D . Длина волны для опыта составляет 275 нм. Числовое значение изогумулонов $C_{из}$, мг/дм³, определяется по формуле:

$$C_{из} = 57,2 \cdot D - 5,9 \quad (2.1)$$

Методика определения полифенолов в пивном сусле. Определение полифенольных веществ осуществляется по методике Еруманиса. Метод основан на взаимодействии полифенолов с лимоннокислым железо-аммонием в щелочной среде [16, 17].

Содержание полифенолов в пивном сусле, X , мг/дм³, определяют по формуле:

$$X = [A - (B + C)] \cdot 820, \quad (2.2)$$

где A – оптическая плотность раствора основного опыта; B – оптическая плотность первого контрольного замера; C – оптическая плотность второго контрольного замера; 820 – коэффициент пересчета на полифенолы.

Значение полифенолов характеризует коллоидную стойкость пива и содержится в пределах 150–300 мг/л [5].

По общему значению показателя высокомолекулярной фракции A можно сделать вывод о стабильности качества пива или о его пониженной стойкости при хранении. Для ее нахождения необходимо найти значение танинового показателя.

Определение танинового показателя считается по следующей методике [23,24]. Колбу объемом 50 см³ наполняют 2,5 см³ суслу и вносят 5 см³ 10% серной кислоты и 5 см³ 1,6% раствора танина. Дистиллированной водой доводят до отметки, перемешивают [75,76]. После раствор переливают в колбу конической формы и объемом 250 см³. После часовой выдержки при температуре 20°C. Смешивают, а потом колориметрируют на фотоэлектроколориметре, на зеленом светофильтре с длиной волны 560 нм против дистиллированной воды. Для определения высокомолекулярной фракции A необходимо знать значение оптической плотности суспензии. Высокомолекулярная фракция белка A , мг/100 см³, определяется по формуле:

$$A = \frac{D + 0,045}{0,0276} \quad (2.3)$$

где D – оптическая плотность суспензии.

Высокомолекулярная фракция белка – фракция A в пиве составляет 12 – 14 мг на 100 см³

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

Для проведения экспериментальной части определена конструкция РПА, а также определены методы проведения экспериментальных исследований: полнофакторного эксперимента; определения качественных характеристик охмеленного пивного сусла (содержание изогумулонов, полифенолов и высокомолекулярной фракции белка А).

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Глава посвящена оценке результатов проведенных экспериментальных исследований. В ней проведен регрессионный анализ на основе полученных экспериментальных данных, который дает возможность изучить процесс, принимая во внимание, влияние различных факторов эксперимента на процесс охмеления пивного сусла экстрактами из хмеля, полученными в РПА. Для проведения экспериментов контрольным образцом являлось охмеленное пивное сусло, где процесс охмеления пивного сусла осуществлялся классическим способом.

3.1 Результаты исследования процесса охмеления пивного сусла хмелевым экстрактом, полученным на роторно-пульсационном аппарате

Полученные экспериментальные данные, приведены в приложении Б. На основе варьируемых параметров и полученных значений были построены графики зависимости содержания изогуμουлона (I , мг/дм³) в хмелевом экстракте на основе пивного сусла от частоты вращения РПА, длительности обработки, температуры среды, величины зазора между ротором и статором.

На рисунках 3.1 – 3.3 представлены графики зависимости содержания изогуμουлона в хмелевом экстракте в зависимости от времени его обработки в РПА и частоты вращения ротора при различных температурах обрабатываемой среды при зазоре между ротором и статором $s = 0,1$ мм.

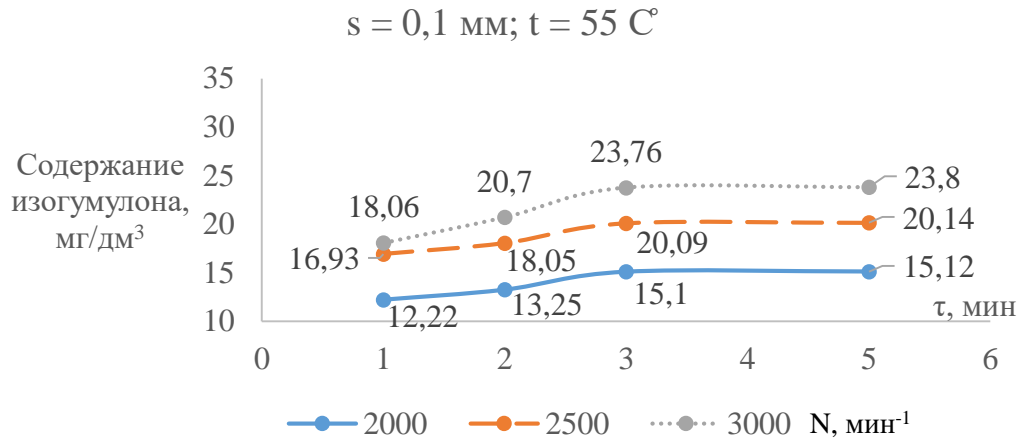


Рисунок 3.1 - График зависимости содержания изогумулона в хмелевом экстракте от длительности обработки и частоты вращения ротора в РПА при $t = 55 \text{ }^\circ\text{C}$ и $s = 0,1 \text{ мм}$

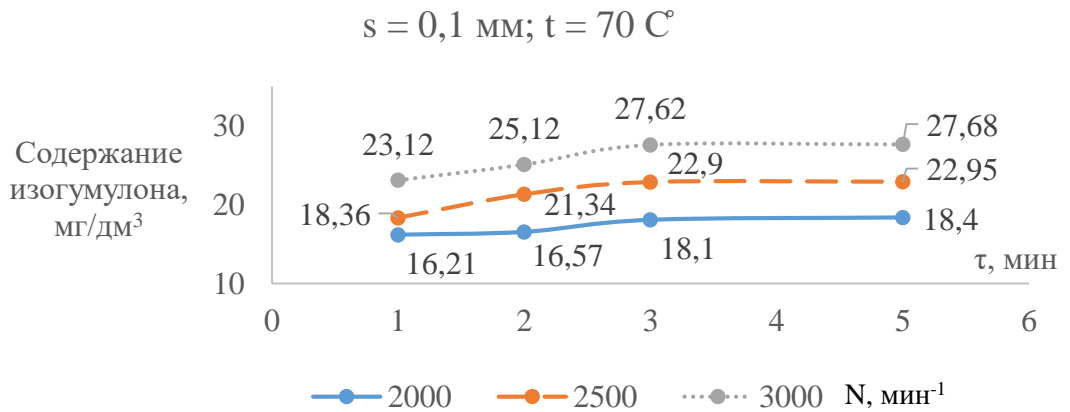


Рисунок 3.2 - График зависимости содержания изогумулона в хмелевом экстракте от длительности обработки и частоты вращения ротора в РПА при $t = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ и $s = 0,1 \text{ мм}$

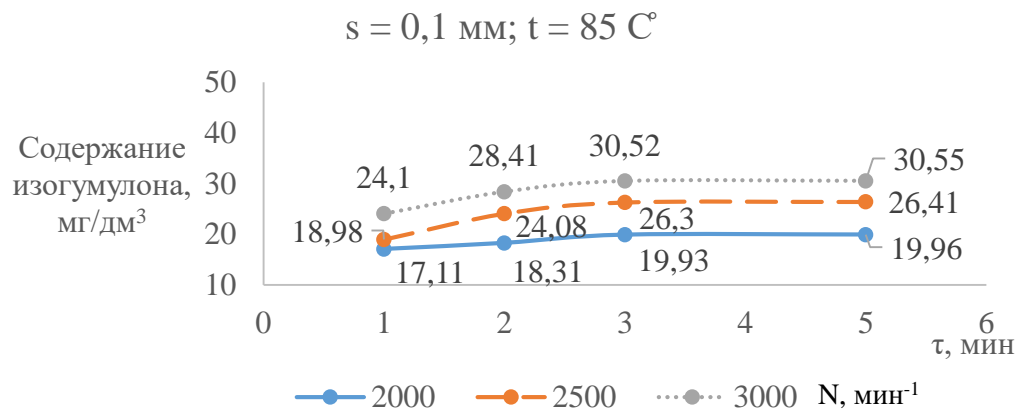


Рисунок 3.3 - График зависимости содержания изогумулона в хмелевом экстракте от длительности обработки и частоты вращения ротора в РПА при $t = 85 \text{ }^\circ\text{C}$ и $s = 0,1 \text{ мм}$

На рисунках 3.4–3.6 представлены результаты содержания изогумулона в охмеленном пивном сусле, с использованием хмелевого экстракта, полученного в РПА при различных температурах со значением зазора между ротором и статором 0,1 мм.

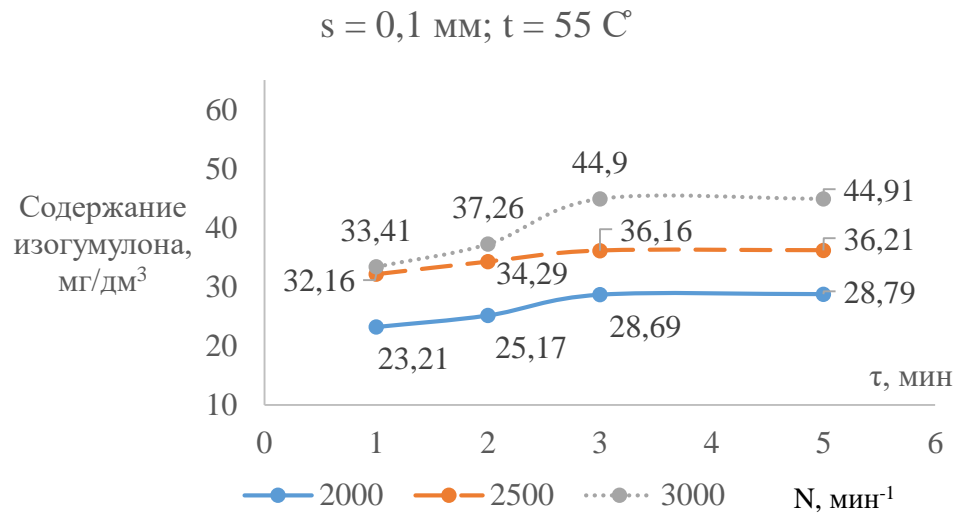


Рисунок 3.4 - График зависимости содержания изогумулона в охмеленном пивном сусле на основе хмелевого экстракта, полученного в РПА при $t = 55 \text{ C}^\circ$ и $s = 0,1 \text{ мм}$

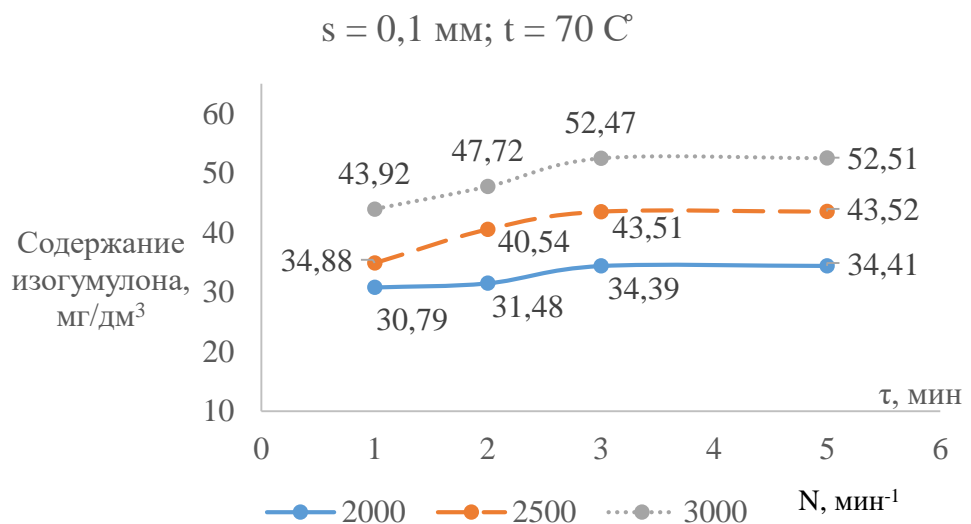


Рисунок 3.5 - График зависимости содержания изогумулона в охмеленном пивном сусле на основе хмелевого экстракта, полученного в РПА при $t = 70 \text{ C}^\circ$ и $s = 0,1 \text{ мм}$

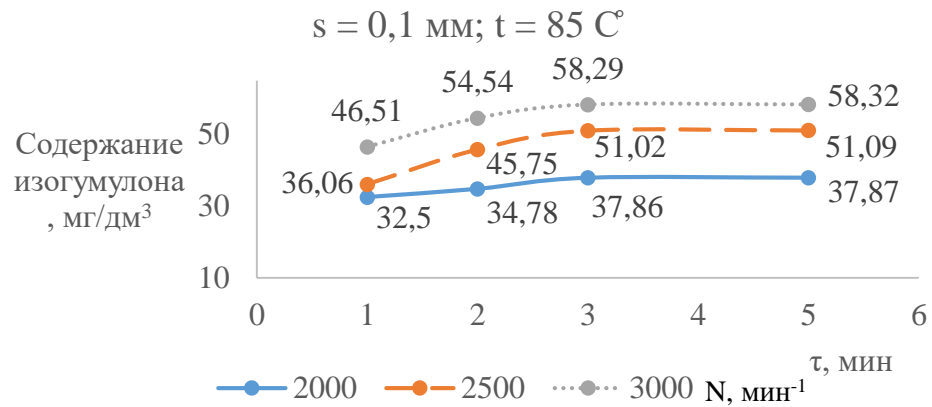


Рисунок 3.6 - График зависимости содержания изогумуллона в охмеленном пивном сусле на основе хмелевого экстракта, полученного в РПА при $t = 85 \text{ }^\circ\text{C}$ и $s = 0,1 \text{ мм}$

Анализируя графики на рисунках 3.1–3.6 видно, что при зазоре между ротором и статором $0,1 \text{ мм}$ значение изогумуллона в образцах хмелевого экстракта и охмеленного пивного сусле имеет максимальную величину при температуре среды $85 \text{ }^\circ\text{C}$, с двух и трехминутной обработкой в роторно-пульсационном аппарате с частотой вращения ротора 3000 мин^{-1} . Его содержание при данных параметрах составляет $28,41$ и $30,52 \text{ мг/дм}^3$ в хмелевом экстракте; $54,54$ и $58,29 \text{ мг/дм}^3$ в охмеленном пивном сусле.

На рисунках 3.7 – 3.9 представлены графики зависимости содержания изогумуллона в хмелевом экстракте в зависимости от времени его обработки в РПА и частоты вращения ротора при различных температурах обрабатываемой среды при зазоре между ротором и статором $s = 0,3 \text{ мм}$.

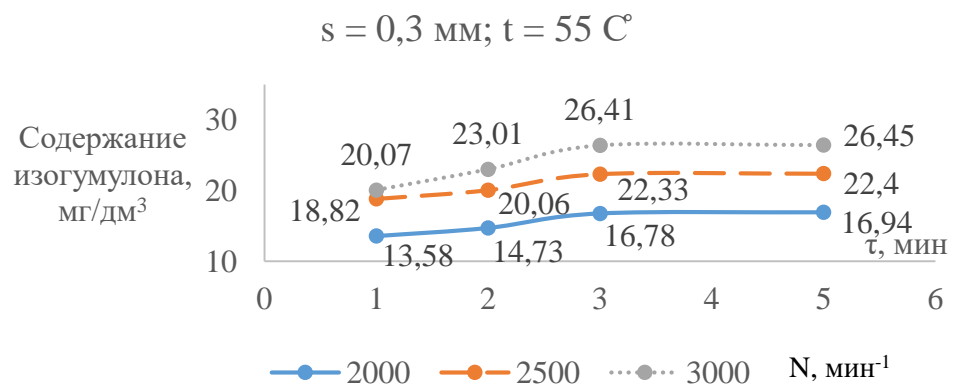


Рисунок 3.7 - График зависимости содержания изогумуллона в хмелевом экстракте от длительности обработки и частоты вращения ротора в РПА при $t = 55 \text{ }^\circ\text{C}$ и $s = 0,3 \text{ мм}$

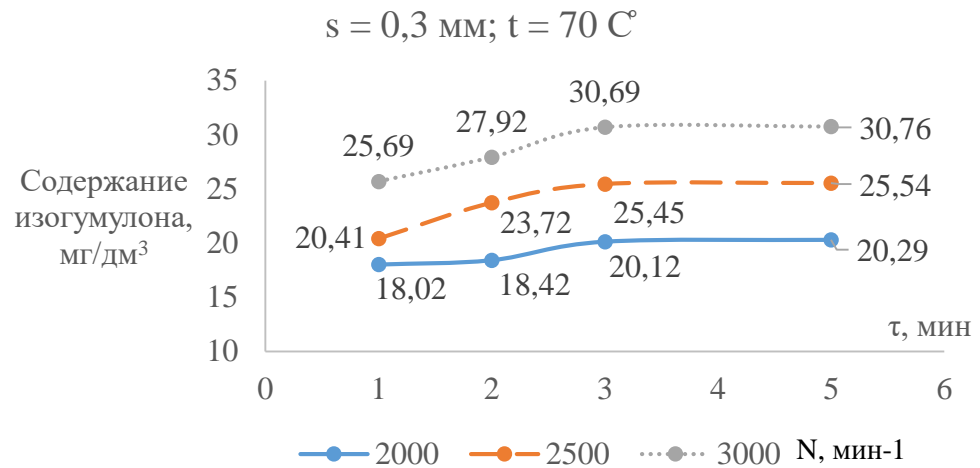


Рисунок 3.8 - График зависимости содержания изогумуллона в хмелевом экстракте от длительности обработки и частоты вращения ротора в РПА при $t = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ и $s = 0,3 \text{ мм}$

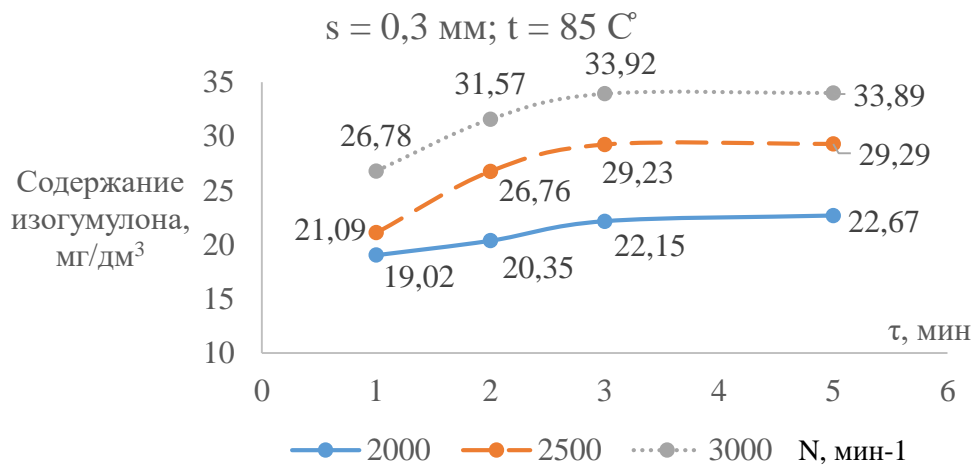


Рисунок 3.9 - График зависимости содержания изогумуллона в хмелевом экстракте от длительности обработки и частоты вращения ротора в РПА при $t = 85 \text{ }^\circ\text{C}$ и $s = 0,3 \text{ мм}$

На рисунках 3.10–3.12 представлены результаты содержания изогумуллона в охмеленном пивном сусле, с использованием хмелевого экстракта, полученного в РПА при различных температурах со значением зазора между ротором и статором 0,3 мм.

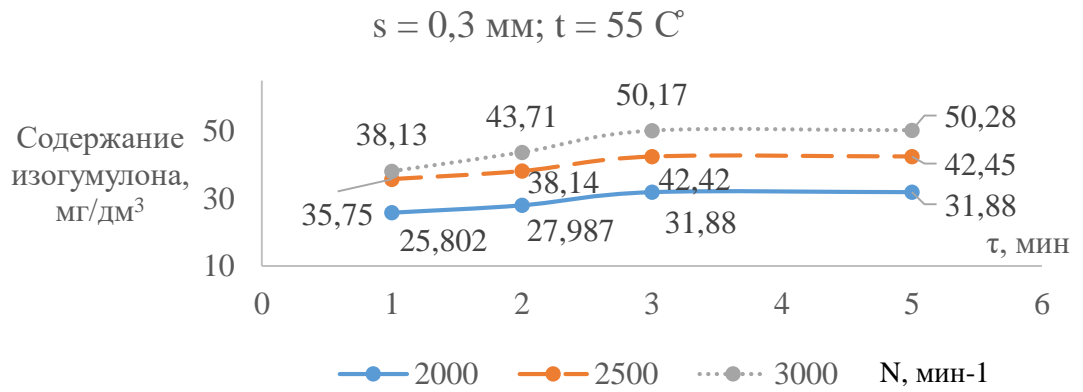


Рисунок 3.10 - График зависимости содержания изогумулона в охмеленном пивном сусле на основе хмелевого экстракта, полученного в РПА при $t = 55 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и $s = 0,3 \text{ мм}$

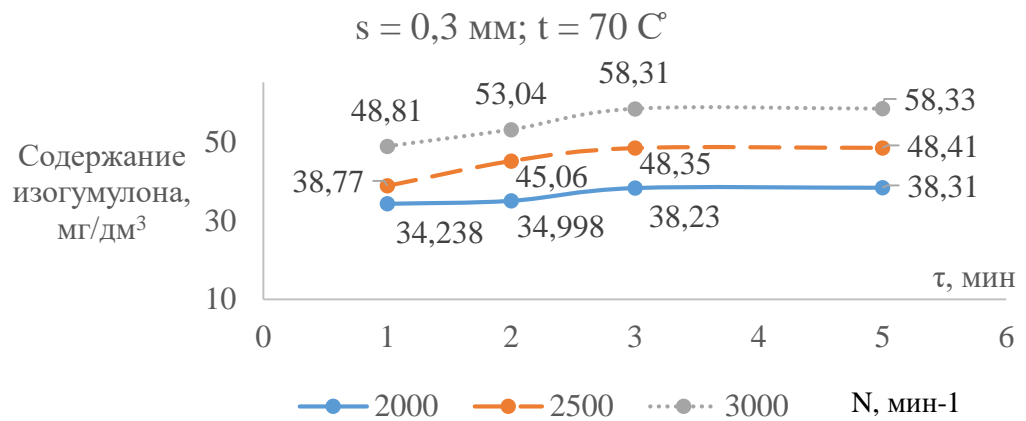


Рисунок 3.11 - График зависимости содержания изогумулона в охмеленном пивном сусле на основе хмелевого экстракта, полученного в РПА при $t = 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и $s = 0,3 \text{ мм}$

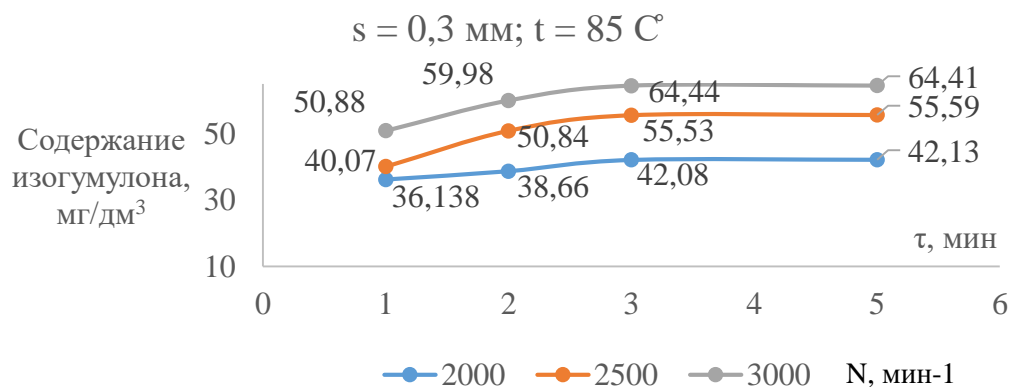


Рисунок 3.12 - График зависимости содержания изогумулона в охмеленном пивном сусле на основе хмелевого экстракта, полученного в РПА при $t = 85 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и $s = 0,3 \text{ мм}$

Анализируя графики на рисунках 3.7–3.12 видно, что при зазоре между ротором и статором 0,3 мм значение изогумулона в образцах хмелевого экстракта и охмеленного пивного сусла имеет максимальную величину при температуре среды 85°C, с двух и трехминутной обработкой в роторно-пульсационном аппарате с частотой вращения ротора 3000 мин⁻¹. Его содержание при данных параметрах, составляет 37,57 и 33,92 мг/дм³ в хмелевом экстракте, 59,98 и 64,44 мг/дм³ в охмеленном пивном сусле.

На рисунках 3.13 – 3.15 представлены графики зависимости содержания изогумулона в хмелевом экстракте от времени его приготовления и частоты вращения при различных температурах обрабатываемой среды при зазоре между ротором и статором $s = 0,5$ мм.

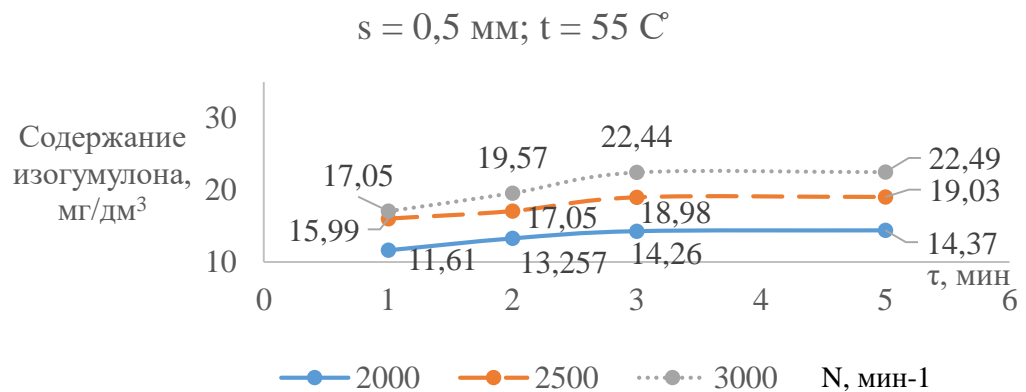


Рисунок 3.13 - График зависимости содержания изогумулона в хмелевом экстракте от длительности обработки и частоты вращения ротора в РПА при $t = 55$ °C и $s = 0,5$ мм

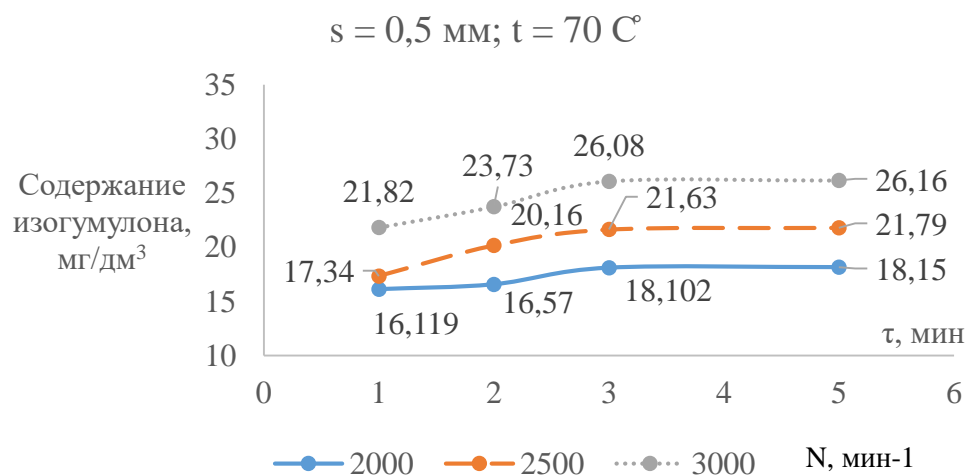


Рисунок 3.14 - График зависимости содержания изогумулона в хмелевом экстракте от длительности обработки и частоты вращения ротора в РПА при $t = 70$ °C и $s = 0,5$ мм

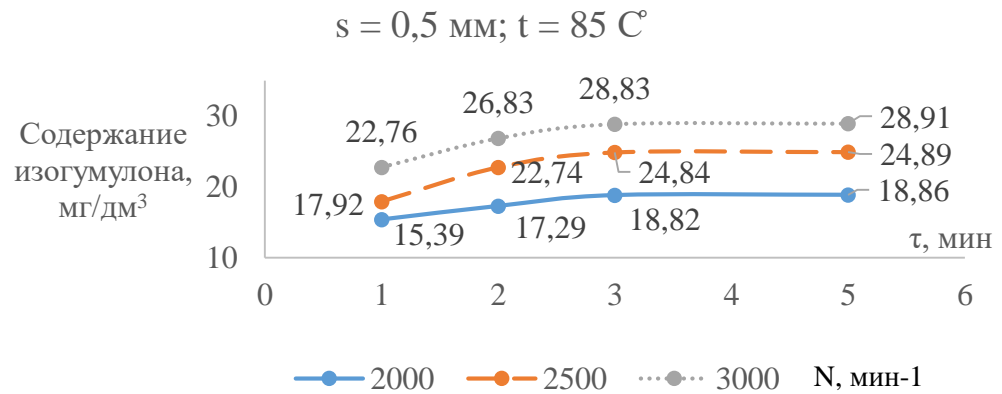


Рисунок 3.15 - График зависимости содержания изогуμουлона в хмелевом экстракте от длительности обработки и частоты вращения ротора в РПА при $t = 85 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и $s = 0,5 \text{ мм}$

На рисунках 3.16 – 3.18 приведены результаты содержания изогуμουлона в пивном сусле, с использованием хмелевого экстракта, полученного в РПА при различных температурах со значением зазора между ротором и статором 0,5 мм.

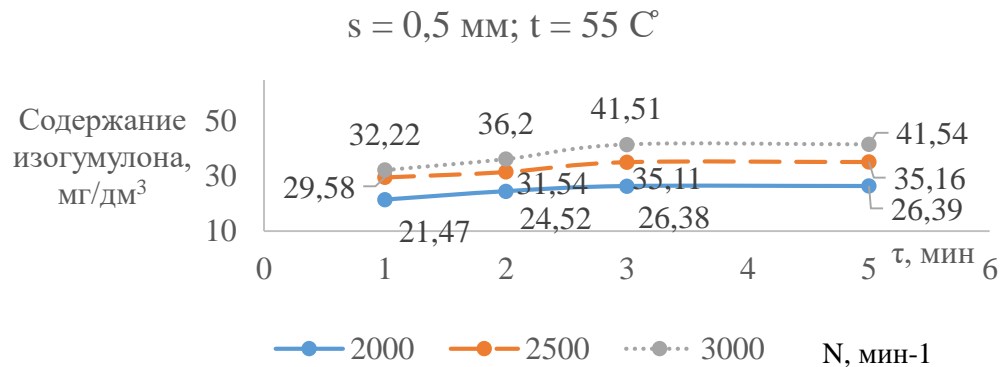


Рисунок 3.16 - График зависимости содержания изогуμουлона в охмеленном пивном сусле на основе хмелевого экстракта, полученного в РПА при $t = 55 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и $s = 0,5 \text{ мм}$

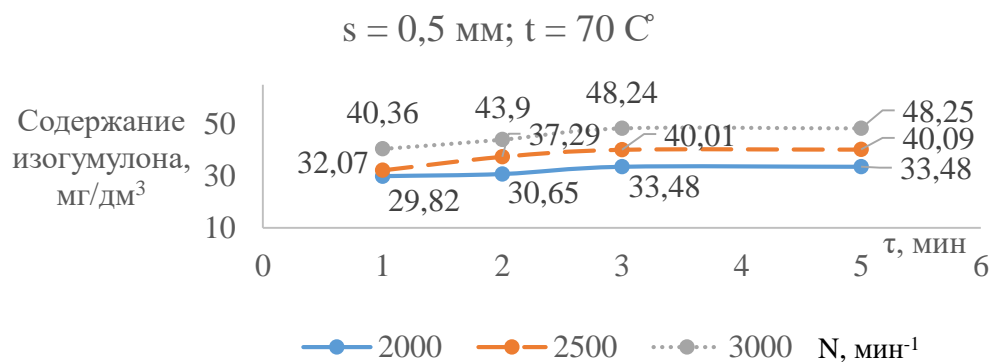


Рисунок 3.17 - График зависимости содержания изогуμουлона в охмеленном пивном сусле на основе хмелевого экстракта, полученного в РПА при $t = 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и $s = 0,5 \text{ мм}$

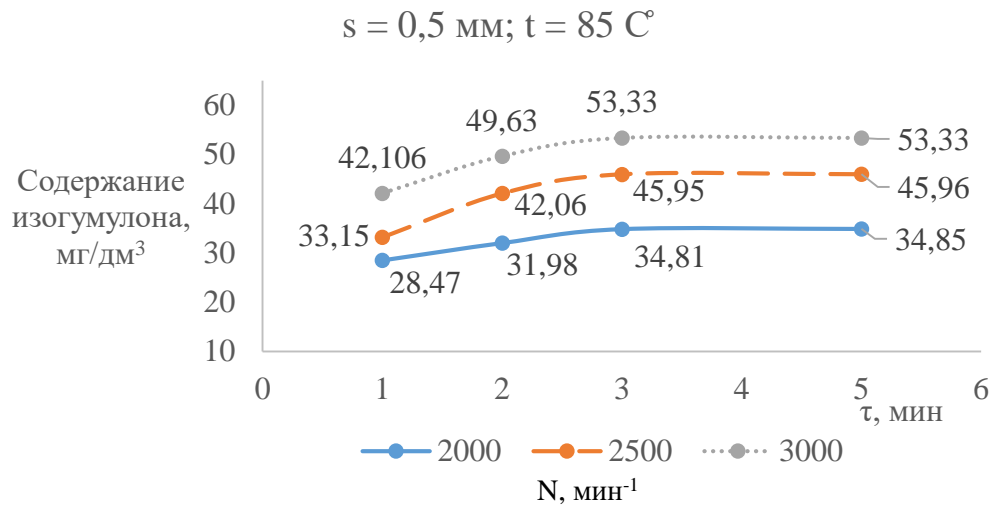


Рисунок 3.18 - График зависимости содержания изогуμουлона в охмеленном пивном сусле на основе хмелевого экстракта, полученного в РПА при $t = 85 \text{ }^\circ\text{C}$ и $s = 0,5 \text{ мм}$

Анализируя графики на рисунках 3.13–3.18 видно, что при зазоре между ротором и статором 0,5 мм значение изогуμουлона в образцах хмелевого экстракта и охмеленного пивного сусла имеет максимальную величину при температуре среды 85°C , с двух и трехминутной обработкой в роторно-пульсационном аппарате с частотой вращения ротора 3000 мин^{-1} . Его содержание при данных параметрах, составляет 26,83 и 28,83 мг/дм³ в хмелевом экстракте, 49,63 и 53,33 мг/дм³ в охмеленном пивном сусле.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что при повышении температуры обрабатываемой среды увеличиваются показатели выхода изогумулонов, так как выход горьких веществ из хмеля происходит в результате изомеризации гумулонов при кипячении хмеля. Увеличение частоты вращения ротора до 3000 мин^{-1} позволяет получить более высокие показатели выхода горьких веществ из хмеля, так как на обрабатываемую среду происходит наложение низкочастотных упругих колебаний и кавитационной энергии. Максимальные показатели содержания изогуμουлона получены при зазоре $s = 0,3 \text{ мм}$. При зазоре $s = 0,1 \text{ мм}$ наблюдается интенсивное разрушение частиц гранулированного хмеля, которое способствует снижению выхода горьких веществ из хмеля. При зазоре $s = 0,5 \text{ мм}$ происходит снижение экстракции компонентов хмеля в пивное сусло. Оптимальными параметрами для хмелевого экстракта приняты: зазор между ротором и статором - 0,3 мм,

температура обрабатываемой среды - 85°C , частота вращения ротора - 3000 мин^{-1} и продолжительность обработки в аппарате в течении двух и трех минут. При этих параметрах содержание изогумулонов составило: 31,57 и 33,92 мг/дм³ в хмелевом экстракте, а в охмеленном пивном сусле 59,98 и 64,44 мг/дм³. Содержание изогумулонов в охмеленном пивном сусле контрольного образца составило - 31,13 мг/дм³. Результаты исследований показали, что содержание изогумулонов в охмеленном пивном сусле, полученном с оптимальными параметрами РПА, больше в 2,07 раза по сравнению с контрольным образцом.

Содержание в охмеленном пивном сусле полифенолов и высокомолекулярной фракции А приведены в приложениях В, Г. Содержание полифенолов во всех образцах было в пределах нормы – 150..200 мг/дм³. Значение высокомолекулярной фракции белка А в сусле всех образцов соответствует норме - 12..14 мг/100 см³.

3.2 Результаты экспериментальных исследований процесса охмеления пивного сусла хмелевым экстрактом, полученным на основе промывных вод

В результате проведенных исследований с экстрагентом на основе пивного сусла определены оптимальные технические и технологические параметры эксперимента: зазор между ротором и статором, $s = 0,1, 0,3 \text{ мм}$, температура обрабатываемой среды $T = 55 - 85^{\circ}\text{C}$, частота вращения ротора, $n = 2500\text{--}3000 \text{ мин}^{-1}$, время обработки $\tau = 1 - 3 \text{ мин}$. При данных факторах эксперимента проводились исследования процесса охмеления пивного сусла с применением хмелевого экстракта, полученного на основе промывных вод. Экспериментальные данные приведены в приложении Д, Е. На рисунках 3.19 – 3.24 приведены графики зависимости содержания изогумулона в хмелевом экстракте на основе первых промывных вод и в охмеленном пивном сусле, полученным на основе экстракта с первыми промывными водами при различных температурах обрабатываемой среды при зазоре между ротором и статором $s = 0,1 \text{ мм}$.

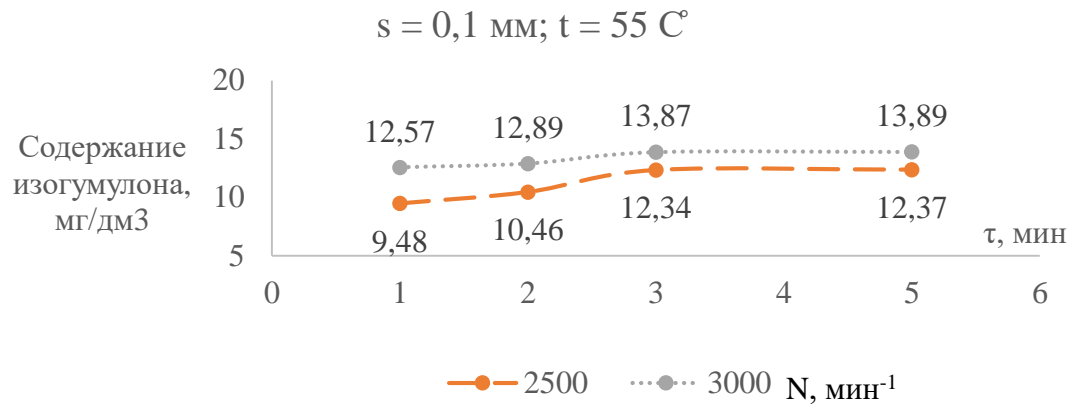


Рисунок 3.19 - График зависимости содержания изогумулона в хмелевом экстракте на основе первых промывных вод от длительности обработки и частоты вращения ротора в РПА при $t = 55 \text{ }^\circ\text{C}$ и $s = 0,1 \text{ мм}$

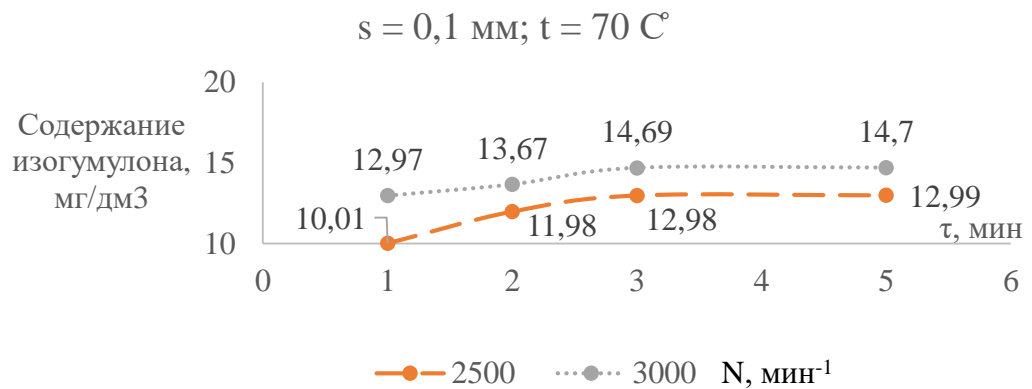


Рисунок 3.20 - График зависимости содержания изогумулона в хмелевом экстракте на основе первых промывных вод от длительности обработки и частоты вращения ротора в РПА при $t = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ и $s = 0,1 \text{ мм}$

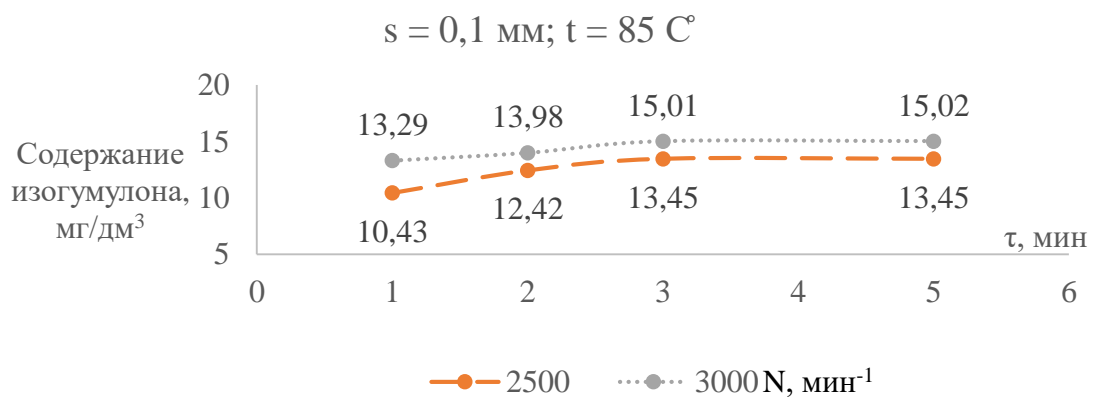


Рисунок 3.21 - График зависимости содержания изогумулона в хмелевом экстракте на основе первых промывных вод от длительности обработки и частоты вращения ротора в РПА при $t = 85 \text{ }^\circ\text{C}$ и $s = 0,1 \text{ мм}$

Из полученных данных, приведенных на рисунках 3.19 – 3.21, можно сделать вывод, что при зазоре между ротором и статором 0,1 мм максимальное значение изогумулона у хмелевого экстракта с температурой обработки 85 °С, продолжительностью 3 мин и частотой вращения ротора 3000 мин⁻¹ составило 15,05 мг/дм³.

В результате проведенных исследований с экстрагентом на основе первых промывных вод определены оптимальные технические и технологические параметры при которых проводилось охмеление пивного сусле на основе промывных вод: зазор между ротором и статором, $s = 0,1, 0,3$ мм, температура обрабатываемой среды $T = 55 - 85$ °С, частота вращения ротора, $n = 2500-3000$ мин⁻¹, время обработки $\tau = 1 - 3$ мин.

Экспериментальные данные представлены в приложении Д, Е. На основе варьируемых параметров, приведенных в таблице 2.1 и полученных значений изогумулона ($I, \text{мг/дм}^3$) в хмелевом экстракте, полученном на первых промывных водах были построены графики зависимости содержания изогумулона.

На рисунках 3.22 – 3.24 представлены графики содержания изогумулона в охмеленном пивном сусле, полученные на основе первых промывных вод при различных температурах обрабатываемой среды при зазоре между ротором и статором $s = 0,1$ мм.

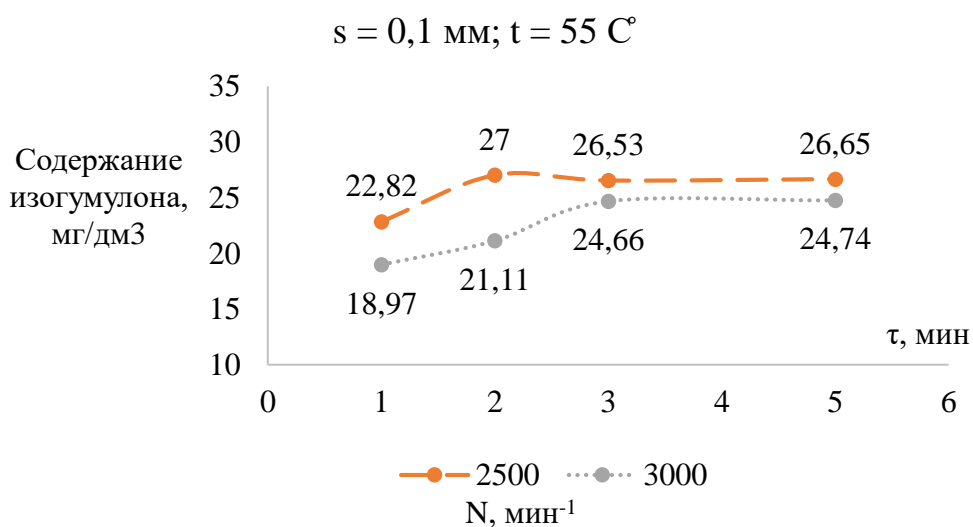


Рисунок 3.22 - График зависимости содержания изогумулона в охмеленном сусле на основе первых промывных вод от длительности обработки и частоты вращения ротора в РПА при $t = 55$ °С и $s = 0,1$ мм

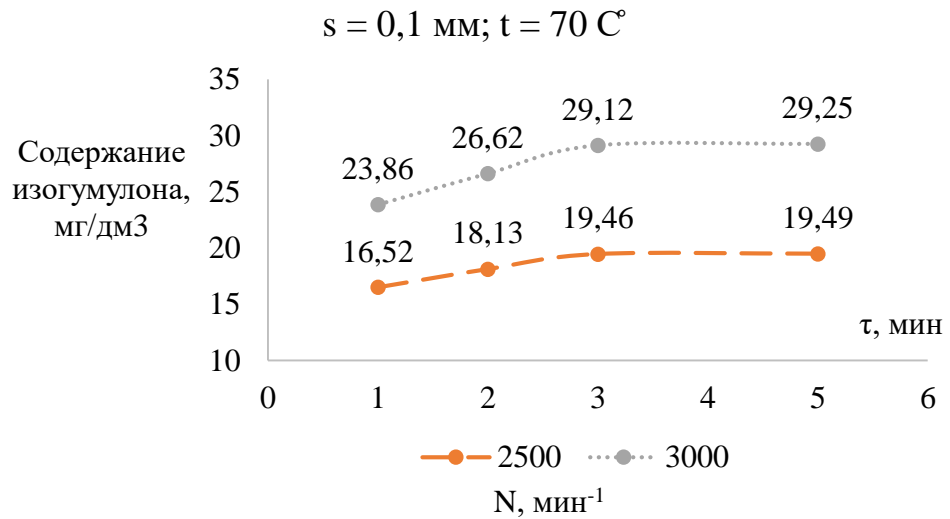


Рисунок 3.23 - График зависимости содержания изогуμουлона в охмеленном сусле на основе первых промывных вод от длительности обработки и частоты вращения ротора в РПА

при $t = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ и $s = 0,1 \text{ мм}$

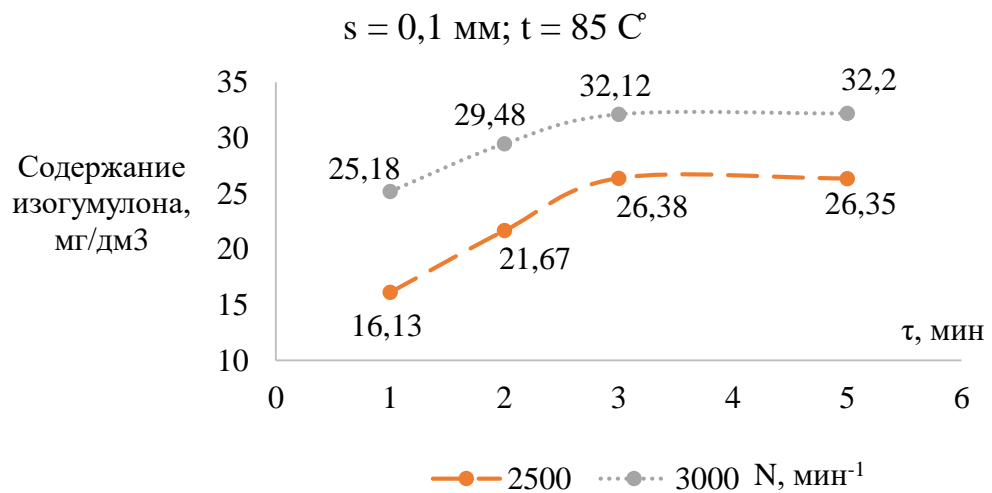


Рисунок 3.24 - График зависимости содержания изогуμουлона в охмеленном сусле на основе первых промывных вод от длительности обработки и частоты вращения ротора в РПА

при $t = 85 \text{ }^\circ\text{C}$ и $s = 0,1 \text{ мм}$

Анализируя графики на рисунках с 3.22 по 3.24 сделан вывод о том, что в охмеленном сусле на основе экстракта, приготовленного на первых промывных водах при зазоре между ротором и статором 0,1 мм максимальный выход изогуμουлона будет 32,12 мг/дм³ при трехминутной обработке в РПА с температурой среды 85°C и при частоте вращения ротора 3000 мин^{-1} .

Дальнейшие исследования по определению выхода изогуμουлона из хмелевого экстракта, приготовленного на первых промывных водах, проводили с зазором между ротором и статором $s = 0,3$ мм. Результаты экспериментов изображены на рисунках 3.25–3.27.

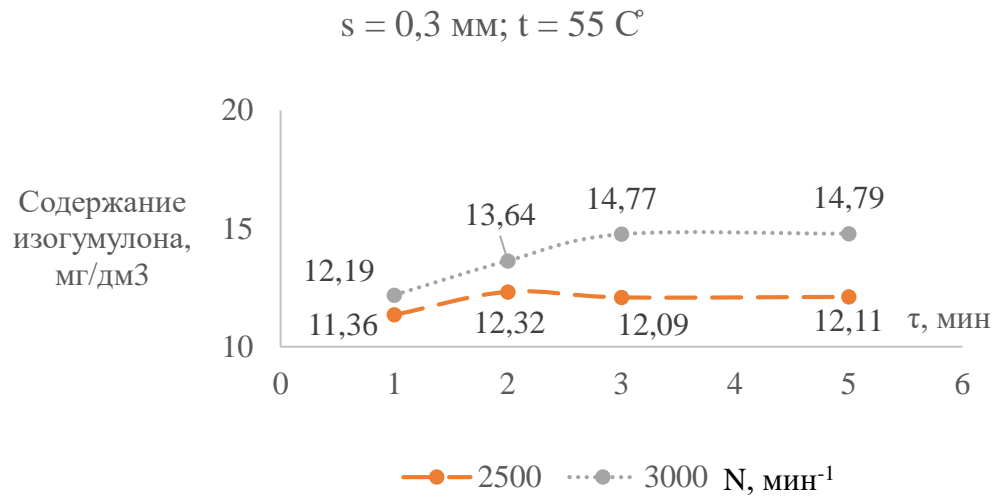


Рисунок 3.25 - График зависимости содержания изогумулона в хмелевом экстракте на основе первых промывных вод от длительности обработки и частоты вращения ротора в РПА при $t = 55$ °С и $s = 0,3$ мм

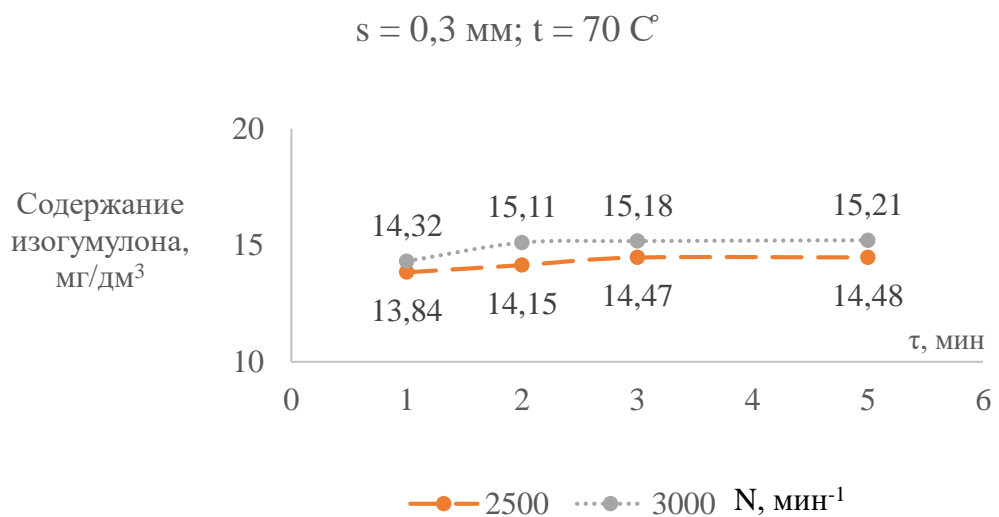


Рисунок 3.26 - График зависимости содержания изогумулона в хмелевом экстракте на основе первых промывных вод от длительности обработки и частоты вращения ротора в РПА при $t = 70$ °С и $s = 0,3$ мм

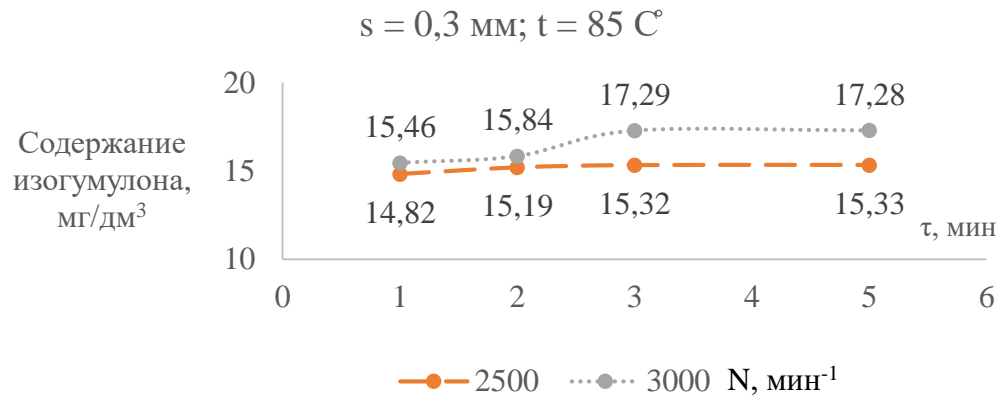


Рисунок 3.27 - График зависимости содержания изогумулона в хмелевом экстракте на основе первых промывных вод от длительности обработки и частоты вращения ротора в РПА при $t = 85 \text{ }^\circ\text{C}$ и $s = 0,3 \text{ мм}$

Анализируя данные рисунков 3.25 – 3.27, видно, что максимальный выход изогумулонов наблюдается в хмелевом экстракте на основе первых промывных вод при зазоре между ротором и статором 0,3 мм, температуре среды $85 \text{ }^\circ\text{C}$, продолжительностью обработки 3 минуты и частотой вращения ротора 3000 мин^{-1} . Содержание изогумулонов при этом составляет $17,29 \text{ мг/дм}^3$.

На рисунках 3.28 – 3.30 представлены результаты исследований для охмеленного сусле на первых промывных водах при зазоре между ротором и статором $s = 0,3 \text{ мм}$.

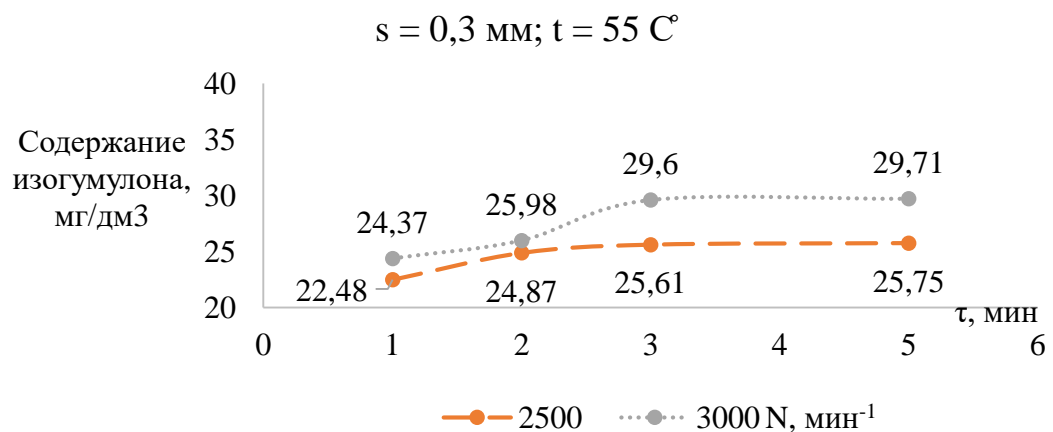


Рисунок 3.28 - График зависимости содержания изогумулона в охмеленном сусле на основе первых промывных вод от длительности обработки и частоты вращения ротора в РПА при $t = 55 \text{ }^\circ\text{C}$ и $s = 0,3 \text{ мм}$

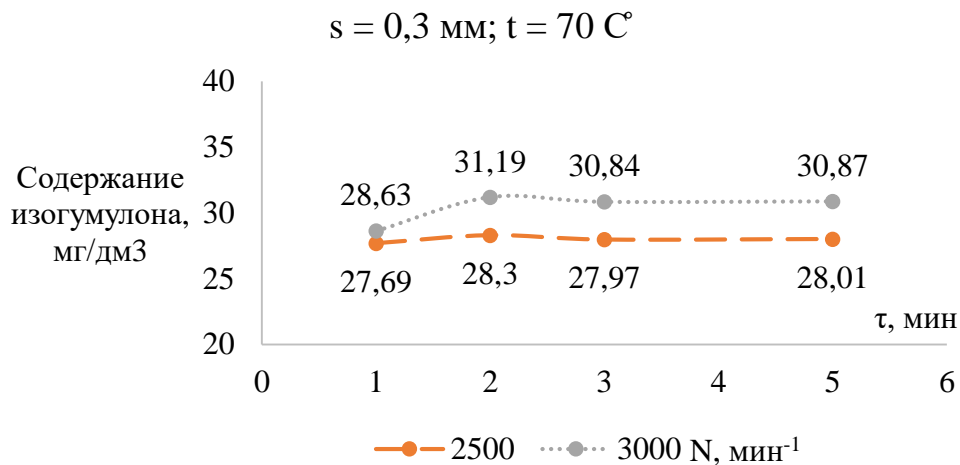


Рисунок 3.29 - График зависимости содержания изогумулона в охмеленном сусле на основе первых промывных вод от длительности обработки и частоты вращения ротора в РПА при $t = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ и $s = 0,3 \text{ мм}$

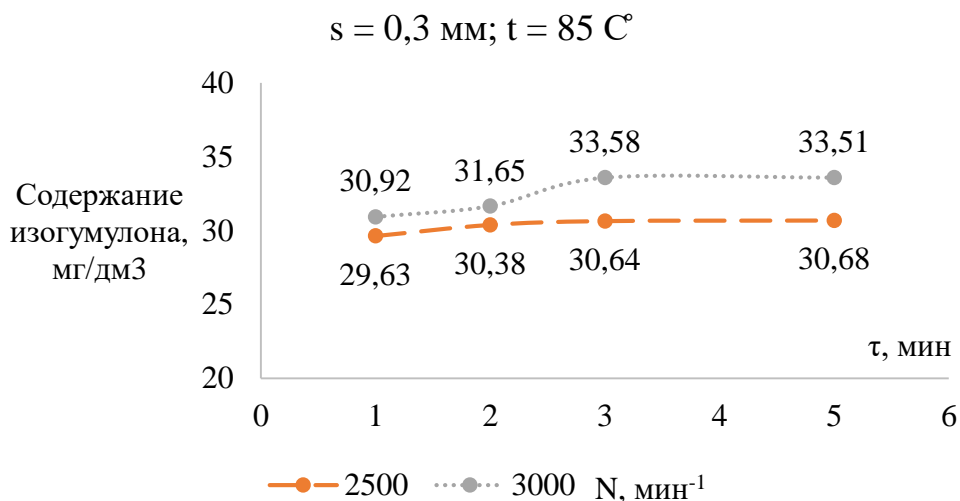


Рисунок 3.30 - График зависимости содержания изогумулона в охмеленном сусле на основе первых промывных вод от длительности обработки и частоты вращения ротора в РПА при $t = 85 \text{ }^\circ\text{C}$ и $s = 0,3 \text{ мм}$

При зазоре между ротором и статором 0,3 мм максимальное значение изогумулона, полученного в охмеленном сусле на основе хмелевого экстракта с первыми промывными водами при температуре среды $85 \text{ }^\circ\text{C}$, продолжительности обработки в РПА 3 мин, частоте вращения ротора 3000 мин^{-1} составило $33,53 \text{ мг/дм}^3$. Данные представлены на рисунках 3.28–3.30.

Затем определялось содержание изогумулона в хмелевом экстракте на основе последних промывных вод. На рисунках 3.31 – 3.33 представлены результаты при зазоре между ротором и статором $s = 0,1$ мм для хмелевого экстракта, приготовленного на последних промывных водах.

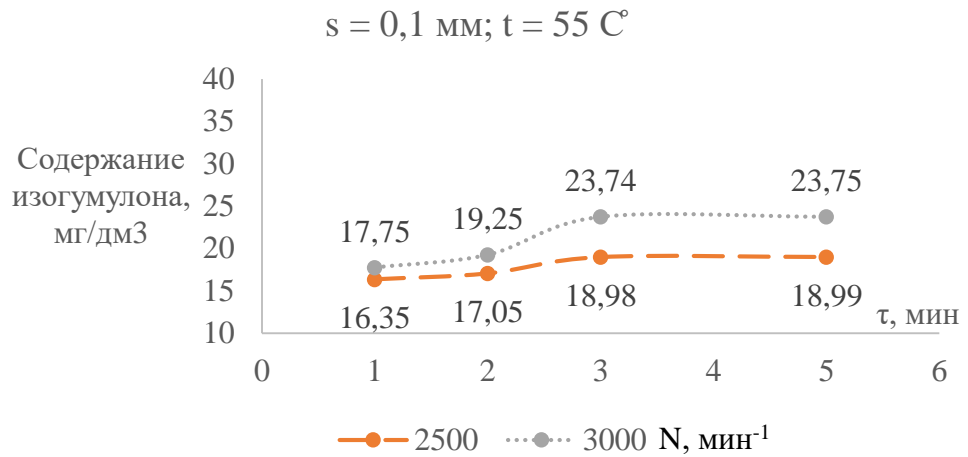


Рисунок 3.31 - График зависимости содержания изогумулона в хмелевом экстракте на основе последних промывных вод от длительности обработки и частоты вращения ротора в РПА при $t = 55$ °С и $s = 0,1$ мм

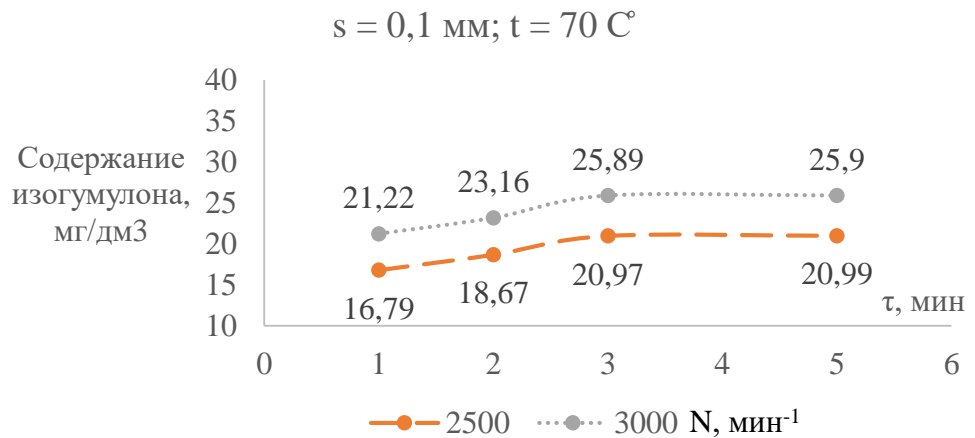


Рисунок 3.32 - График зависимости содержания изогумулона в хмелевом экстракте на основе последних промывных вод от длительности обработки и частоты вращения ротора в РПА при $t = 55$ °С и $s = 0,1$ мм

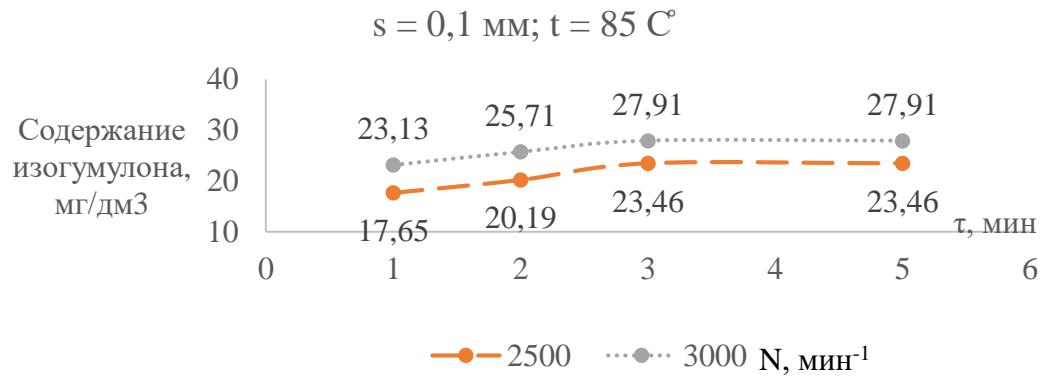


Рисунок 3.33 - График зависимости содержания изогулмулона в хмелевом экстракте на основе последних промывных вод от длительности обработки и частоты вращения ротора в РПА при $t = 55 \text{ }^\circ\text{C}$ и $s = 0,1 \text{ мм}$

При зазоре между ротором и статором $0,1 \text{ мм}$ максимальный выход изогулмулона в хмелевом экстракте на основе последних промывных вод составил $27,91 \text{ мг/дм}^3$. Данные получены при температуре среды $85 \text{ }^\circ\text{C}$ и трехминутной обработке в аппарате с частотой вращения ротора 3000 мин^{-1} и приведены на рисунках 3.30 – 3.33.

Следующим этапом эксперимента являлось определение содержания изогулмулона в пивном сусле, полученном на основе хмелевого экстракта из последних промывных вод. На рисунках 3.34 – 3.36 представлены результаты значений содержания изогулмулона при зазоре между ротором и статором $s = 0,1 \text{ мм}$ для пивного сусла, приготовленного на последних промывных водах.

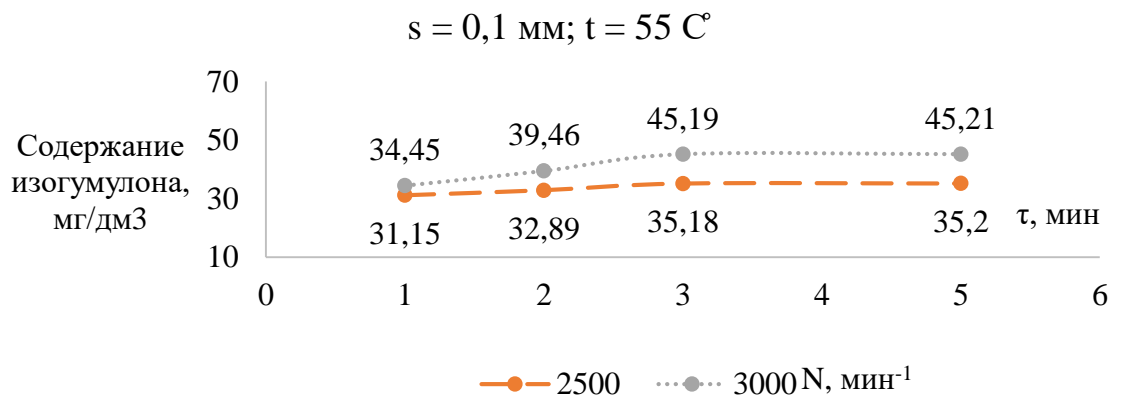


Рисунок 3.34 - График зависимости содержания изогулмулона в охмеленном сусле на основе последних промывных вод от длительности обработки и частоты вращения ротора в РПА при $t = 55 \text{ }^\circ\text{C}$ и $s = 0,1 \text{ мм}$

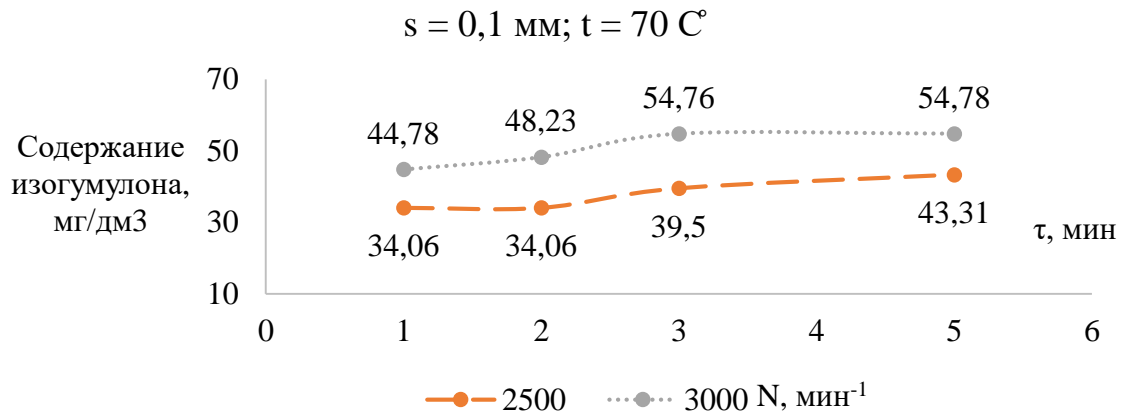


Рисунок 3.35 - График зависимости содержания изогумулона в охмеленном сусле на основе последних промывных вод от длительности обработки и частоты вращения ротора в РПА при $t = 55 \text{ }^\circ\text{C}$ и $s = 0,1 \text{ мм}$

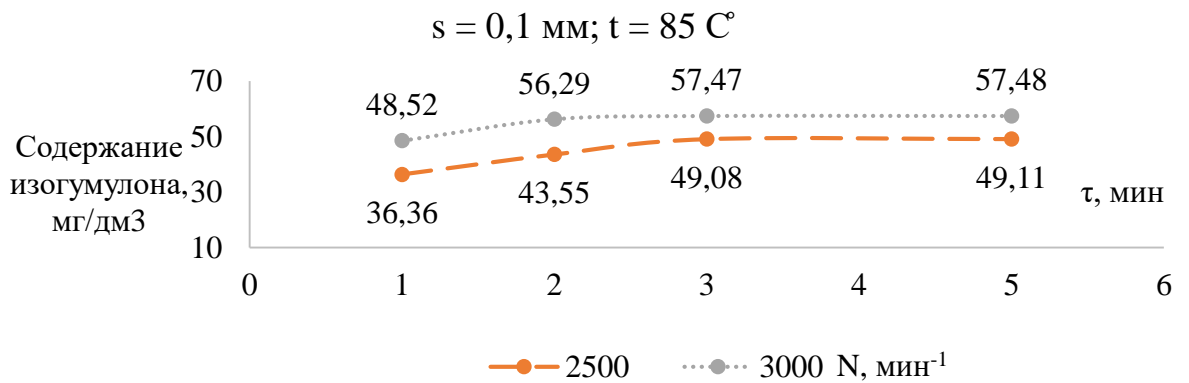


Рисунок 3.36 - График зависимости содержания изогумулона в охмеленном сусле на основе последних промывных вод от длительности обработки и частоты вращения ротора в РПА при $t = 55 \text{ }^\circ\text{C}$ и $s = 0,1 \text{ мм}$

Как видно из представленных графиков на рисунках 3.34 – 3.36 наибольшее содержание изогумулона в пивном сусле на основе последних промывных вод при зазоре между ротором и статором 0,1 мм, температуре среды $85 \text{ }^\circ\text{C}$ и трехминутной обработке в аппарате с частотой вращения ротора 3000 мин^{-1} составило $57,47 \text{ мг/дм}^3$.

Результаты исследований содержания изогумулона из хмелевого экстракта, приготовленного на последних промывных водах при величине зазора между ротором и статором $s=0,3 \text{ мм}$ изображены на рисунках 3.37–3.39.

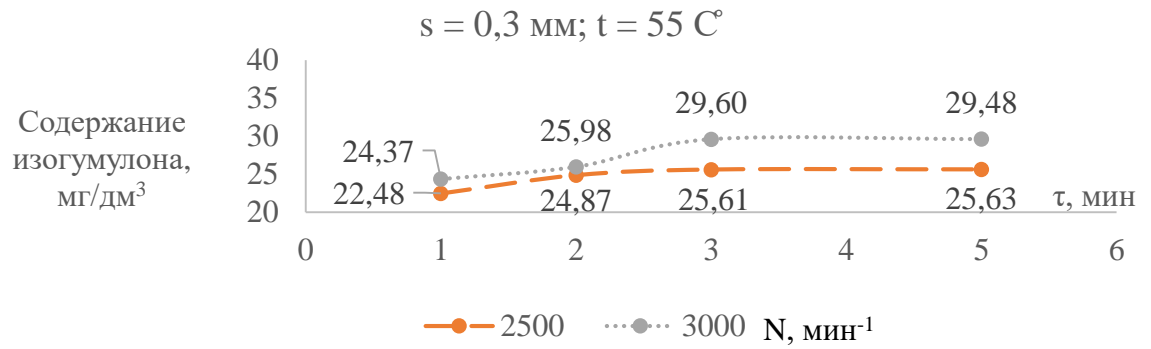


Рисунок 3.37 - График зависимости содержания изогумуллона в хмелевом экстракте на основе последних промывных вод от длительности обработки и частоты вращения ротора в РПА при $t = 55 \text{ °C}$ и $s = 0,3 \text{ мм}$

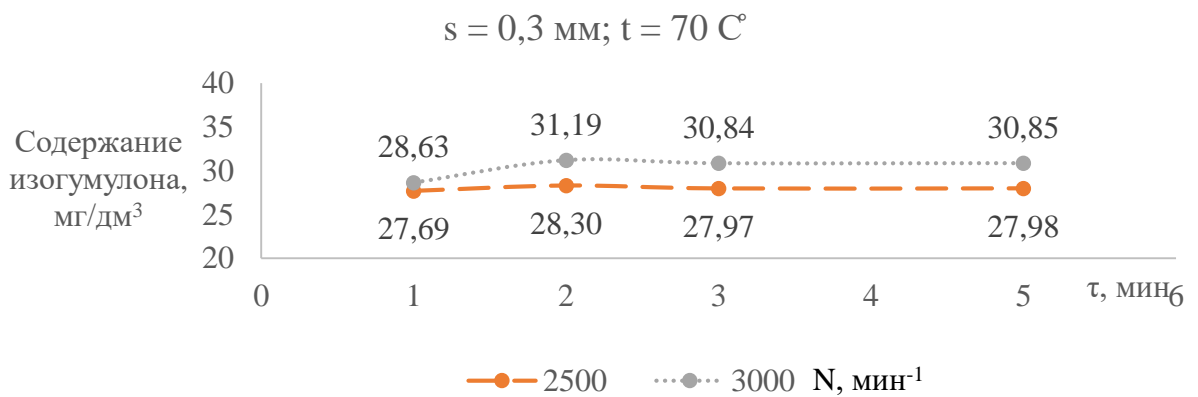


Рисунок 3.38 - График зависимости содержания изогумуллона в хмелевом экстракте на основе последних промывных вод от длительности обработки и частоты вращения ротора в РПА при $t = 70 \text{ °C}$ и $s = 0,3 \text{ мм}$

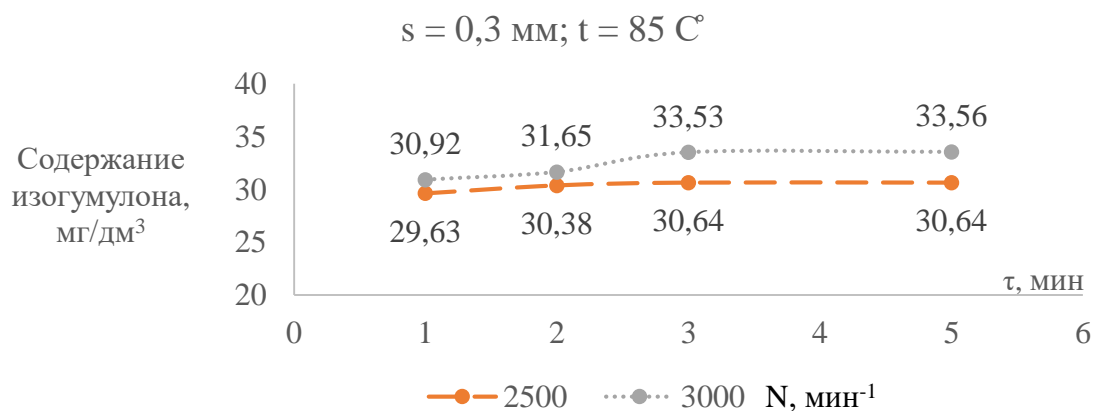


Рисунок 3.39 - График зависимости содержания изогумуллона в хмелевом экстракте на основе последних промывных вод от длительности обработки и частоты вращения ротора в РПА при $t = 85 \text{ °C}$ и $s = 0,3 \text{ мм}$

Как видно из представленных графиков на рисунках 3.37 – 3.39 наибольшее содержание изогумулона в хмелевом экстракте на основе последних промывных вод при зазоре между ротором и статором 0,3 мм, температуре среды 85 °С и трехминутной обработке в аппарате с частотой вращения ротора 3000 мин⁻¹ составило 33,53 мг/дм³.

Результаты экспериментальных исследований охмеленного пивного сусла, приготовленного на основе последних промывных вод при зазоре между ротором и статором $s = 0,3$ мм приведены на рисунках 3.40–3.42.

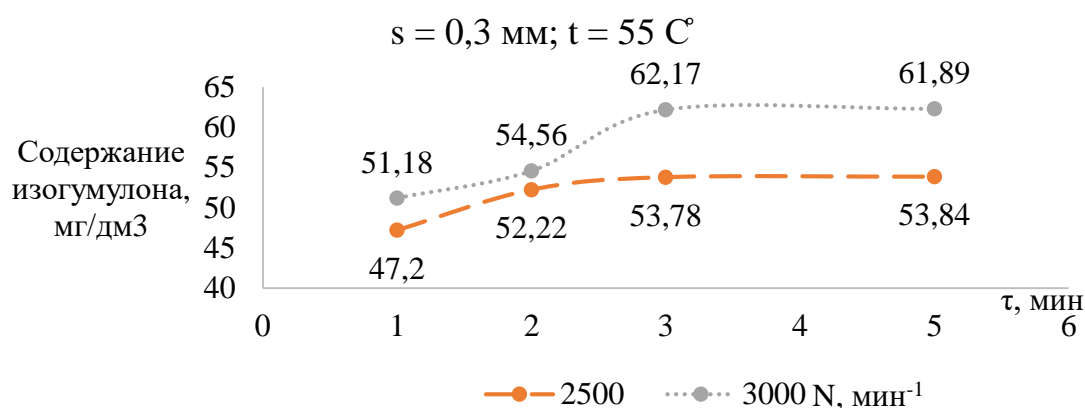


Рисунок 3.40 - График зависимости содержания изогумулона в охмеленном сусле на основе последних промывных вод от длительности обработки и частоты вращения ротора в РПА при $t = 55$ °С и $s = 0,3$ мм

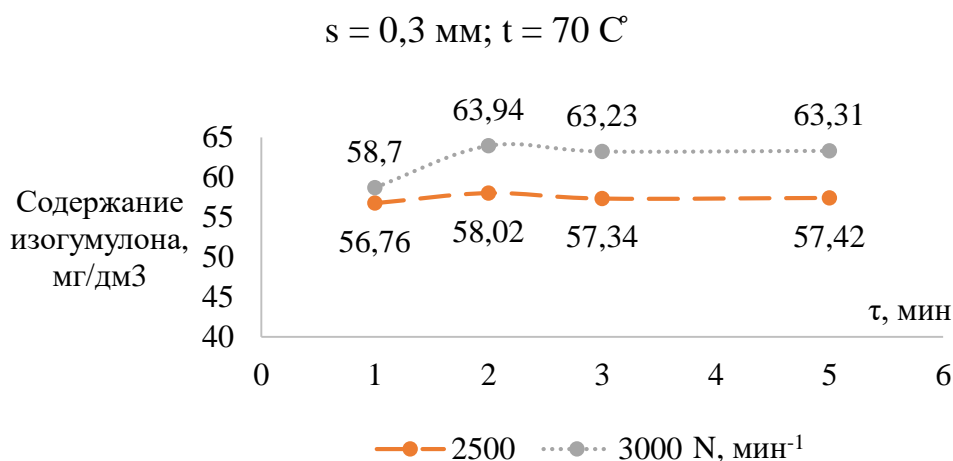


Рисунок 3.41 - График зависимости содержания изогумулона в охмеленном сусле на основе последних промывных вод от длительности обработки и частоты вращения ротора в РПА при $t = 70$ °С и $s = 0,3$ мм

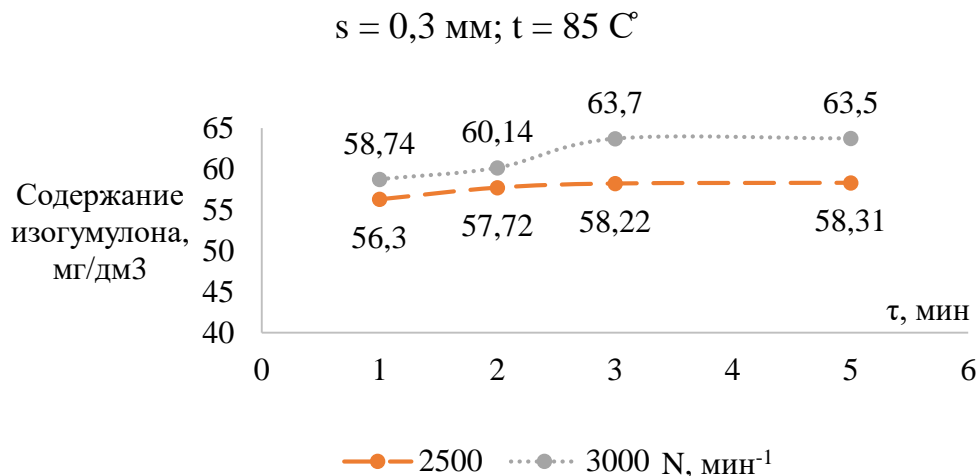


Рисунок 3.42 - График зависимости содержания изогумулона в охмеленном сусле на основе последних промывных вод от длительности обработки и частоты вращения ротора в РПА при $t = 85 \text{ }^\circ\text{C}$ и $s = 0,3 \text{ мм}$

Анализ графиков на рисунках 3.40 – 3.42 показал, что максимальное содержание изогумулона в охмеленном сусле на основе экстракта с последними промывными водами составило $63,7 \text{ мг/дм}^3$. Данные получены при зазоре между ротором и статором $0,3 \text{ мм}$, температуре среды $85 \text{ }^\circ\text{C}$, продолжительностью обработки в РПА – 3 мин , частоте вращения ротора 3000 мин^{-1} .

Как видно из приведенных данных, повышение температуры обрабатываемой среды увеличивает показатели выхода изогумулонов. Их образование происходит в результате изомеризации гумулонов при кипячении хмеля. Увеличение частоты вращения ротора до 3000 мин^{-1} позволяет повысить показатели по выходу экстракта из хмеля, так как при этом на обрабатываемую среду происходит наложение низкочастотных упругих колебаний и кавитационной энергии. Максимальные показатели по содержанию изогумулона получены при зазоре $s = 0,3 \text{ мм}$. При зазоре $s = 0,1 \text{ мм}$ частицы гранулированного хмеля сильно измельчаются и нарушается их структура.

На основе проведенных исследований для получения хмелевого экстракта на основе промывных вод определены следующие оптимальные параметры РПА: зазор $s = 0,3 \text{ мм}$, температура обрабатываемой среды, $T = 85 \text{ }^\circ\text{C}$, частота вращения ротора $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$, продолжительность обработки $\tau = 3 \text{ мин}$.

При данных параметрах получены следующие значения изогумулона:

- в хмелевом экстракте на основе первых промывных вод – 17,29 мг/дм³;
- в хмелевом экстракте на основе последних промывных вод - 33,53 мг/дм³;
- в охмеленном пивном сусле с использованием хмелевого экстракта на основе первых промывных вод - 33,58 мг/дм³;
- в охмеленном пивном сусле с использованием хмелевого экстракта на основе последних промывных вод - 63,7 мг/дм³.

3.3 Регрессионный анализ

Применение математической модели, основанной на регрессионном анализе, дает возможность изучить процесс, принимая во внимание, влияние различных факторов эксперимента [66, 77, 78, 79, 80, 81, 82].

Для получения уравнения регрессии в форме полинома второго порядка (3.1) используют центральные композиционные планы второго порядка:

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{j=1}^k b_j X_j + \sum_{\substack{u,j=1 \\ u \neq j}}^k b_{uj} X_u \cdot X_j + \sum_{\substack{u,j,i=1 \\ u \neq j \neq i}}^k b_{uji} X_u \cdot X_j \cdot X_i + \sum_{j=1}^k b_{jj} X_j^2, \quad (3.1)$$

где b – коэффициент уравнения регрессии, X – коэффициенты матрицы планирования.

Наибольшее распространение получили планы Бокса-Уилсона, которые используют чтобы сократить число опытов. Для них число опытов рассчитывают по формуле:

$$N = 2^k + 2 \cdot k + n_0, k \leq 5, \quad (3.2)$$

$$N = 2^{k-p} + 2 \cdot k + n_0, k \geq 5, \quad (3.3)$$

где $p = 1$, при $k = 5, 6, 7$,

$p = 2$, при $k = 8$,

k – число факторов уравнения регрессии,

N – число опытов,

P – число степеней свободы,

n_0 – число опытов серии.

План Бокса-Уилсона состоит из трех частей:

1. ядра плана, состоящего из точек ПФЭ или ДФЭ;

2. $2 \cdot k$ звездных точек с координатам $(\pm \alpha; 0; 0; \dots; 0)$, $(0; \pm \alpha; 0; \dots; 0)$, ..., $(0; 0; 0; \dots; \pm \alpha)$,

где $+\alpha$ и $-\alpha$ – уровень фактора, называемый звездным плечом;

3. n_0 точек центра плана.

План второго порядка строят, руководствуясь выбранным критерием оптимальности (ортогональности, рототабельности, D – оптимальности и т.д.). В планах первого порядка большинство оптимальных свойств совмещаются. План второго порядка обычно обладает только одним из оптимальных свойств.

Композиционные планы второго порядка приводят к ортогональным или рототабельным путем выбора соответствующей величины звездного плеча α и числа опытов в центре плана n_0 .

В работе выбран центральный композиционный ортогональный план второго порядка.

В центральных композиционных ортогональных планах (ЦКОП) число опытов в центре плана задается произвольно. Для выбранного n_0 находят соответствующее значение α .

Чтобы выполнялось свойство ортогональности, квадратичные столбцы матрицы X_j^2 преобразуют:

$$X'_j = X_j^2 - \bar{X}_j^2 = X_j^2 - \frac{\sum_{i=1}^N X_{ji}^2}{N}, \quad (3.4)$$

Коэффициенты уравнения регрессии при ортогональном планировании определяются по формулам:

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N X_{ji} Y_i}{\sum_{i=1}^N X_{ji}^2}; \quad (3.5)$$

$$b_{uj} = \frac{\sum_{i=1}^N X_{ji} X_{ui} Y_i}{\sum_{i=1}^N (X_{ji} X_{ui})^2}; \quad (3.6)$$

$$b_{jj} = \frac{\sum_{i=1}^N X_{ji} Y_i}{\sum_{i=1}^N X_{ji}^2}; \quad (3.7)$$

$$b'_0 = \frac{\sum_{i=1}^N X_{0i} Y_i}{\sum_{i=1}^N X_{0i}^2}; \quad (3.8)$$

Ошибки определения коэффициентов определяются по формулам:

$$S_{b_0} = \frac{S_{\text{восп}}}{\sqrt{N}}, \quad (3.9)$$

$$S_{b_j} = \frac{S_{\text{восп}}}{\sqrt{2^{k+2} \alpha^2}} \quad \text{при } k < 5, \quad (3.10)$$

$$S_{b_j} = \frac{S_{\text{восп}}}{\sqrt{2^{k-1} + 2 \alpha^2}} \quad \text{при } k \geq 5, \quad (3.11)$$

$$S_{b_{uj}} = \frac{S_{\text{восп}}}{\sqrt{2^k}} \quad \text{при } k < 5, \quad (3.12)$$

$$S_{b_{uj}} = \frac{S_{\text{восп}}}{\sqrt{2^{k-1}}} \quad \text{при } k \geq 5, \quad (3.13)$$

$$S_{b_{jj}} = \frac{S_{\text{восп}}}{\sqrt{2^k (1 - \bar{X}_j^2)^2 + 2(\alpha^2 - \bar{X}_j^2) + n_0 (\bar{X}_j^2)^2}} \quad \text{при } k < 5, \quad (3.14)$$

$$S_{b_{jj}} = \frac{S_{\text{восп}}}{\sqrt{2^{k-1}(1-\bar{X}_j^2)^2 + 2(\alpha^2 - \bar{X}_j^2)^2 + n_0(\bar{X}_j^2)^2}} \quad \text{при } k \geq 5, \quad (3.15)$$

где $S_{\text{восп}}$ – дисперсия воспроизводимости.

Проверка значимости коэффициентов уравнения регрессии заключается в том, чтобы выяснить, является ли его отличие от нуля ошибкой эксперимента.

Это осуществляют проверкой нулевой гипотезы H_0 теоретического коэффициента регрессии:

$$H_0: B_j = 0, \quad (3.16)$$

Коэффициент B_j статистически равен нулю, а отличие от нуля его оценки b_j случайно. Гипотеза H_0 проверяется по критерию Стьюдента t_j :

$$t_j = \frac{|b_j|}{Sb_j}, \quad (3.17)$$

где Sb_j – квадратичная ошибка определения коэффициента b_j .

$$Sb_j = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{db_j}{dy_i}\right)^2 S_{\text{восп}}^2}, \quad (3.18)$$

где $S_{\text{восп}}^2$ – дисперсия воспроизводимости.

Существуют следующие способы расчета дисперсии воспроизводимости:

1) Если в выборке есть параллельные измерения, то

$$S_{\text{восп}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{u=1}^{m_i} (y_{iu} - \bar{y}_i)^2}{f_{\text{восп}}}, \quad (3.19)$$

где

$$\bar{y}_i = \frac{1}{m_i} \sum_{u=1}^{m_i} y_{iu}, \quad (3.20)$$

где m – число параллельных измерений в i -м опыте, $f_{\text{восп}}$ – число степеней свободы дисперсии $S_{\text{восп}}^2$. Если $m_1 = m_2 = \dots = m_N$, то $f_{\text{восп}} = N(m - 1)$, если $m_1 \neq m_2 \neq \dots \neq m_N$, то $f_{\text{восп}} = \sum_{i=1}^N (m_i - 1)$.

2) Если при осуществлении выборки исследования не повторялись, то есть не было измерений параллельных между собой тогда, для определения $S_{\text{восп}}^2$ ставят отдельную серию опытов, которые ставятся при одних и тех же значениях входных параметров:

$$S_{\text{восп}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_0} (y_i^0 - \bar{y}^0)^2}{f_{\text{восп}}}, \quad (4.21)$$

где $f_{\text{восп}} = n_0 - 1$,

$$\bar{y}^0 = \frac{\sum_{i=1}^{n_0} y_i^0}{n_0},$$

Для проверки гипотезы H_0 расчетное значение критерия Стьюдента сравнивается с критическим значением $t_{\text{кр}}$, найденным по таблице квантилей распределения Стьюдента для заданного уровня значимости p и числа степеней свободы $f_{\text{восп}}$.

Если $t > t_{\text{кр}}(p, f_{\text{восп}})$, то гипотеза H_0 отклоняют, а коэффициент b_j принимают значимым. Коэффициенты без значимости удаляют из регрессионного уравнения.

В регрессионном уравнении коэффициенты были найдены по данным пассивного эксперимента и высчитываются в зависимости друг от друга, значит они взаимно коррелированы, следовательно, коэффициенты уравнения, которые остались после отброса незначимых коэффициентов, необходимо заново считать, применяя систему нормальных уравнений.

Считается, что регрессионная модель адекватна экспериментальным данным, если отклонения расчетного значения \hat{y} от экспериментального y обусловлены только ошибкой воспроизводимости эксперимента.

Разброс расчетных значений \hat{y} относительно экспериментальных характеризует дисперсия адекватности $S_{ад}^2$:

$$S_{ад}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{f_{ад}}, \quad (3.22)$$

где $f_{ад}$ – число степеней свободы дисперсии адекватности.

$$f_{ад} = N - l, \quad (3.23)$$

где l – число значимых коэффициентов.

Оценку адекватности модели проводят, сравнивая дисперсию адекватности с дисперсией воспроизводимости при помощи критерия Фишера. А потом большую по величине дисперсию, ставят в числитель. Возможны 3 случая:

1) Если $S_{ад}^2 > S_{восп}^2$, то критерий Фишера рассчитывают:

$$F = \frac{S_{ад}^2}{S_{восп}^2}. \quad (3.24)$$

Модель считают адекватной, если выполняется условие $F < F_{кр}(p, f_1, f_2)$.

Критическое значение $F_{кр}$ определяют по таблице квантилей распределения Фишера для каждого определенного уровня значимости p и по числу степеней свободы $f_1 = f_{ад}$ и $f_2 = f_{восп}$. Если выполняется данное условие, то считается, что сравниваемые дисперсии однородны. При $F > F_{кр}$, точность описания объекта принятой модели сильно ниже точности, при помощи которой приняты результаты эксперимента. В таком варианте увеличивают

степень полинома, увеличивая при необходимости также число опытов в эксперименте.

2) Если $S_{ад}^2 < S_{восп}^2$, то критерий Фишера определяют по формуле:

$$F = \frac{S_{восп}^2}{S_{ад}^2}. \quad (3.25)$$

Если в этом случае $F > F_{кр}$, то уравнение неоправданно точно описывает экспериментальные данные, полученные с большой доверительной ошибкой.

3) Если в эксперименте параллельные опыты, а также отдельные опыты для расчета дисперсии воспроизводимости не ставились, то критерий Фишера рассчитывают по формуле:

$$F = \frac{S_{\bar{y}}^2}{S_{ад}^2}, \quad (3.26)$$

где $S_{\bar{y}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}{N-1}$ - дисперсия относительно среднего значения y .

Полученная модель адекватна, если выполняется условие $F > F_{кр}(p, f_1, f_2)$, где $f_1 = N - 1$, $f_2 = N - l$. В данном варианте F демонстрирует, как сильно уменьшается разброс данных эксперимента, по сравнению с уравнением, которое было получено с разбросом относительно среднего y .

Если полученная модель адекватна, то регрессионное уравнение переводится из безразмерного в натуральный масштаб. Для этого воспользуемся формулой:

$$X_j = \frac{Z_j - Z_j^0}{\Delta Z_j}, \quad (3.27)$$

где Z^0 – основной, или нулевой уровень фактора;

ΔZ – интервал варьирования каждого фактора.

При построении регрессионной модели зависимости содержания изогумулона в сусле в зависимости от режимных и технологических

параметров РПА, факторами являются время обработки, температура среды и частота вращения ротора, которые представлены в таблице 3.1.

Построение матрицы центрального композиционного ортогонального плана второго порядка (ЦКОП) в безразмерном масштабе для двух факторов, при $n_0 = 1$, $\alpha = 1$ представлено в таблице 3.2. В таблице 3.3 приведена расширенная матрица планирования ЦКОП для различных зазоров.

Таблица 3.1 – Уровни и интервалы варьирования факторов

Варьируемые факторы	Нижний уровень	Верхний уровень	Нулевой уровень	Интервал варьирования
Z1 – время обработки сула в РПА, мин	1	3	2	1
Z2 – температура сула, °C	55	85	70	15
Z3 – частота вращения ротора, мин ⁻¹	2000	3000	2500	500

Преобразование квадратичных столбцов:

$$X_1^2 = \frac{\sum_{i=1}^N x_{1i}^2}{N} = \frac{2}{3}, \quad (3.28)$$

$$X'_{11} = 1 - \frac{2}{3} = \frac{1}{3}, \quad (3.29)$$

$$X'_{11} = X'_{12} = \dots = X'_{110}, \quad (3.30)$$

$$X'_{111} = \dots = X'_{115} = 0 - \frac{2}{3} = -\frac{2}{3}, \quad (3.31)$$

Таблица 3.2 – Матрица планирования ЦКОП

N	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁ X	X ₁ X	X ₁ X	X ₂ X	X ₁ X ₂ X ₃	X ₁ '	X ₂ '	X ₃ '	X ₁ ²	X ₂ ²	X ₃ ²	Y
1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	1/3	1/3	1/3	1	1	1	y ₁
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	1/3	1/3	1/3	1	1	1	y ₂
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	1/3	1/3	1/3	1	1	1	y ₃
4	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	1/3	1/3	1/3	1	1	1	y ₄
5	+1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	1/3	1/3	1/3	1	1	1	y ₅
6	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	1/3	1/3	1/3	1	1	1	y ₆
7	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	1/3	1/3	1/3	1	1	1	y ₇
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	1/3	1/3	1/3	1	1	1	y ₈
9	+1	-1	0	0	0	0	0	0	0	1/3	-2/3	-2/3	1	0	0	y ₉
10	+1	+1	0	0	0	0	0	0	0	1/3	-2/3	-2/3	1	0	0	y ₁₀
11	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	2/3	1/3	-2/3	0	1	0	y ₁₁
12	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	2/3	1/3	-2/3	0	1	0	y ₁₂
13	+1	0	-1	0	0	0	0	0	0	2/3	2/3	1/3	0	0	1	y ₁₃
14	+1	0	+1	0	0	0	0	0	0	2/3	2/3	1/3	0	0	1	y ₁₄
15	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	2/3	2/3	-2/3	0	0	0	y ₁₅

Таблица 3.3 - Расширенная матрица планирования ЦКОП для зазоров $s = 0,1..0,5$ мм

N	Z_1	Z_2	Z_3	X_3'	X_1^2	X_2^2	X_3^2	y $S = 0,1$	y $S = 0,3$	y $S = 0,5$
1	1	55	2000	1/3	1	1	1	12,22	13,58	11,61
2	3	55	2000	1/3	1	1	1	15,1	16,78	14,26
3	1	85	2000	1/3	1	1	1	17,11	19,02	15,39
4	3	85	2000	1/3	1	1	1	19,93	22,15	18,82
5	1	55	3000	1/3	1	1	1	18,06	20,07	17,05
6	3	55	3000	1/3	1	1	1	23,76	26,41	22,44
7	1	85	3000	1/3	1	1	1	24,1	26,78	22,76
8	3	85	3000	1/3	1	1	1	30,52	33,92	28,83
9	1	70	2500	-2/3	1	0	0	18,36	20,41	17,34
10	3	70	2500	-2/3	1	0	0	22,9	25,45	21,63
11	2	55	2500	-2/3	0	1	0	18,05	20,06	17,05
12	2	85	2500	-2/3	0	1	0	24,08	26,76	22,74
13	2	70	2000	1/3	0	0	1	16,57	18,42	16,57
14	2	70	3000	1/3	0	0	1	25,12	27,92	23,73
15	2	70	2500	-2/3	0	0	0	21,34	23,72	20,16

Рассмотрим вариант построения регрессионной модели для зазора $s = 0,1$ мм. Дисперсия воспроизводимости определена по отдельной серии опытов и составляет $S_{\text{восп}} = 0,251$. Число степеней свободы дисперсии воспроизводимости $f_{\text{восп}} = 3$. Расчеты матрицы выполнены в среде MathCAD (Prime 4.0).

При $k = 3; \alpha = 1; n_0 = 1$:

$$X = \begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & -1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ 1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & -1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ 1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{3} & \frac{-2}{3} & \frac{-2}{3} \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{3} & \frac{-2}{3} & \frac{-2}{3} \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-2}{3} & \frac{1}{3} & \frac{-2}{3} \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-2}{3} & \frac{1}{3} & \frac{-2}{3} \\ 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-2}{3} & \frac{-2}{3} & \frac{1}{3} \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-2}{3} & \frac{-2}{3} & \frac{1}{3} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-2}{3} & \frac{-2}{3} & \frac{-2}{3} \end{pmatrix}$$

$$Y = \begin{pmatrix} 12,22 \\ 15,1 \\ 17,11 \\ 19,9 \\ 18,06 \\ 23,76 \\ 24,1 \\ 30,52 \\ 18,36 \\ 22,9 \\ 18,05 \\ 24,08 \\ 16,57 \\ 25,12 \\ 21,34 \end{pmatrix}$$

Расчет коэффициентов уравнения регрессии B производят по формуле:

$$B = ((X^T \cdot X)^{-1}) \cdot (X^T \cdot Y), \quad (3.32)$$

$$B = \begin{bmatrix} 20,479 \\ 2,233 \\ 2,852 \\ 4,066 \\ 0,079 \\ 0,806 \\ 0,389 \\ 0,101 \\ -0,605 \\ -0,17 \\ -0,39 \end{bmatrix}$$

Рассчитанные параметры регрессионного уравнения при $s=0.1$ мм приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Параметры уравнения регрессии при $s = 0.1$ мм

Параметр		Значение параметра
1	2	3
1. Безразмерные коэффициенты	b_0	20,479
	b_1	2,233
	b_{11}	2,852
	b_{12}	4,066
	b_{13}	0,079
	b_2	0,806
	b_{22}	0,389
	b_{23}	0,101
	b_3	-0,605
	b_{33}	-0,17
	B_{123}	-0,39
2. Дисперсия воспроизводимости	$S_{\text{восп}}$	0,251
	$f_{\text{восп}}$	3

Продолжение таблицы 3.4

1	2	3
3. Расчетный критерий Стьюдента	t_0	316
	t_1	28,133
	t_{11}	6,119
	t_{12}	0,887
	t_{13}	9,085
	t_2	35,932
	t_{22}	1,719
	t_{23}	4,381
	t_3	51,226
	t_{33}	3,944
	t_{123}	1,141
	4. Критический критерий Стьюдента	$t_{кр}$
5. Дисперсия адекватности	$S^2_{ад}$	0,06
	$f_{ад}$	7
6. Критерий Фишера	$F_{расч}$	4,214
	$F_{кр}$	4,4

Критическое значение критерия Стьюдента определяем по справочнику в зависимости от значения числа степеней свободы дисперсии воспроизводимости:

$$t_{кр}=3,18$$

Если $t > t_{кр}$, то коэффициент считают значимым. Таким образом, коэффициенты b_4 , b_7 и b_9 считаются незначимыми и исключаются из уравнения.

Уравнение регрессии примет вид:

$$y(x_1, x_2, x_3) = 20,479 + 2,233 \cdot x_1 + 2,852 \cdot x_2 + 4,066 \cdot x_3 + 0,806 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,389 \cdot x_2 \cdot x_3 - (-0,605) \cdot x_1^2 - 0,39 \cdot x_3^2, \quad (3.33)$$

Оценим адекватность уравнения регрессии. Число значимых коэффициентов $L=8$.

Значения расчетного выходного параметра I_p в сравнении с исходными данными I :

$$I_p = \begin{bmatrix} 12,192 \\ 15,045 \\ 17,118 \\ 19,972 \\ 17,934 \\ 24,012 \\ 24,415 \\ 30,494 \\ 18,305 \\ 22,771 \\ 18,291 \\ 23,995 \\ 16,687 \\ 24,819 \\ 21,143 \end{bmatrix} \quad I = \begin{bmatrix} 12,22 \\ 15,1 \\ 17,11 \\ 19,9 \\ 18,06 \\ 23,76 \\ 24,1 \\ 30,52 \\ 18,36 \\ 22,9 \\ 18,05 \\ 24,08 \\ 16,57 \\ 25,12 \\ 21,34 \end{bmatrix}.$$

Модель регрессионного уравнения принимается адекватной экспериментальным данным, так как обосновывается оценкой по критерию Фишера ($F_{кр}=4,4$; $F_p=4,314$; $F_{кр}>F_p$).

Критическое значение критерия Фишера определяем по справочным таблицам, $F_{кр}=4,4$. Переведем уравнение 3.33 в натуральный масштаб:

$$y(x_1, x_2, x_3) = 20,479 + 2,233 \cdot x_1 + 2,852 \cdot x_2 + 4,066 \cdot x_3 + 0,806 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,389 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0,605 \cdot x_1^2 - 0,39 \cdot x_3^2, \quad (3.34)$$

где

$$\begin{aligned} x_1(z_1) &= \frac{z_1 - 2}{1}, \\ x_2(z_2) &= \frac{z_2 - 70}{15}, \\ x_3(z_3) &= \frac{z_3 - 2500}{500}. \end{aligned}$$

Тогда:

$$29,757 + 2,458 \cdot \left(\frac{z_1 - 2}{1}\right) + 1,132 \cdot \left(\frac{z_2 - 70}{15}\right) - 2,785 \cdot \left(\frac{z_2 - 70}{15}\right)^2,$$

$$20,479 + 2,233 \cdot \frac{x_1-2}{1} + 2,852 \cdot \frac{x_2-70}{15} + 4,066 \cdot \frac{x_3-2500}{500} + 0,806 \cdot \frac{z_1-2}{1} \cdot \frac{x_3-2500}{500} +$$

$$+ 0,389 \cdot \frac{z_2-70}{15} \cdot \frac{z_3-2500}{500} - 0,605 \cdot \left(\frac{z_1-2}{1}\right)^2 - 0,39 \cdot \left(\frac{z_3-2500}{500}\right)^2, \quad (3.35)$$

$$y(z_1, z_2, z_3) = -12,659 + 0,623 \cdot z_1 + 0,0604 \cdot z_2 + 0,00907 \cdot z_3 + 0,00161 \cdot z_1 \cdot z_3 +$$

$$+ 0,00051 \cdot z_2 \cdot z_3 - 0,605 \cdot z_1^2 - 0,00000156 \cdot z_3^2, \quad (3.36)$$

Или

$$Y(t, T, n) = -12,659 + 0,623 \cdot t + 0,0604 \cdot T + 0,00907 \cdot n + 0,00161 \cdot t \cdot n +$$

$$+ 0,000051 \cdot T \cdot n - 0,605 \cdot t^2 - 0,00000156 \cdot n^2 \quad (3.37)$$

Построим поверхности отклика в диапазоне: $t=1...3$ мин, $T=55...85$ °С, $n=2000...3000$ мин⁻¹. На рисунке 3.43 изображена поверхность зависимости содержания изогумулонов от температуры при постоянной заданной частоте вращения ротора, построенная на основе регрессионного уравнения:

$$I_1(T, n) = -16,235 + 0,0604 \cdot T + 0,0139 \cdot n + 0,000051 \cdot T \cdot n -$$

$$0,00000159 \cdot n^2 \quad (3.38)$$

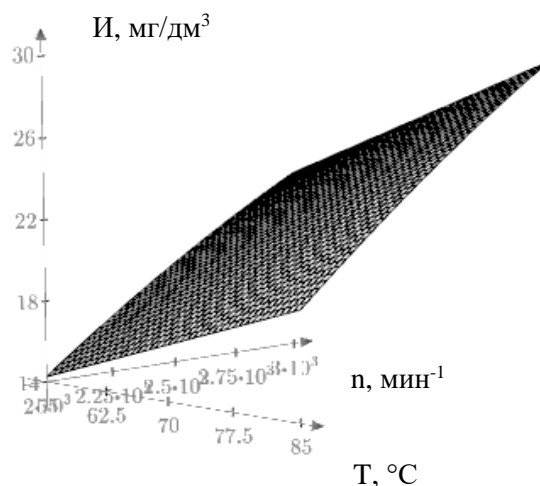


Рисунок 3.43 – Зависимость содержания изогумулона от температуры при частоте вращения ротора $s = 0,1$ мм

На рисунке 3.44 представлена поверхность зависимости содержания изогумулона от времени обработки и частоты вращения ротора, полученная по уравнению:

$$I_2(t, n) = -7,525 + 0,623 \cdot t + 0,013405 \cdot n + 0,00161 \cdot t \cdot n - 0,605 \cdot t^2 - 0,00000156 \cdot n^2, \quad (3.39)$$

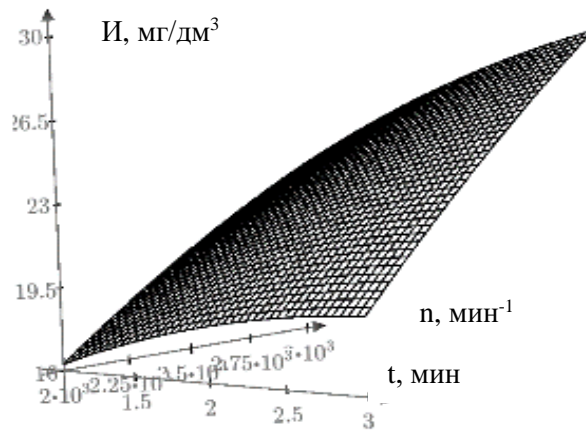


Рисунок 3.44 – Зависимость содержания изогумулона от времени и частоты вращения ротора при $s = 0,3$ мм

На рисунке 3.45 приведена поверхность зависимости содержания изогумулона от времени обработки и температуры согласно уравнению:

$$I_3(t, T) = 0,511 + 5,453 \cdot t + 0,2134 \cdot T - 0,605 \cdot t^2 \quad (3.40)$$

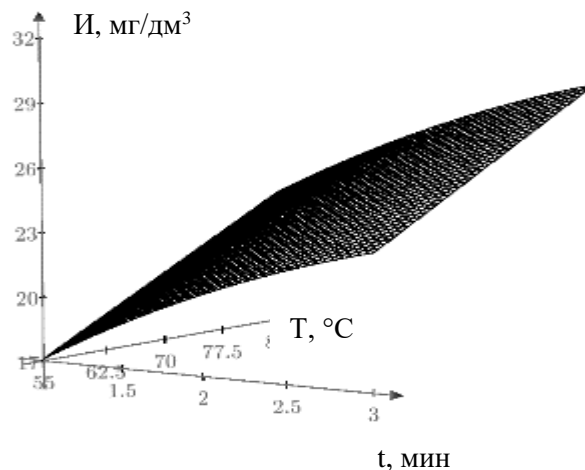


Рисунок 3.45 – Зависимость содержания изогумулона от времени и температуры при $s = 0,5$ мм

Аналогичным образом проведен регрессионный анализ для зазора $s=0,3$ мм. Дисперсия воспроизводимости определена по отдельной серии опытов и составляет

$S_{\text{восп}}=0,251$. Число степеней свободы дисперсии воспроизводимости $f_{\text{восп}}=3$. Расчеты матрицы выполнены в среде MathCAD (Prime 4.0) при $k=3$; $\alpha=1$; $n_o=1$.

$$Y = \begin{bmatrix} 13,58 \\ 16,78 \\ 19,02 \\ 22,15 \\ 20,07 \\ 26,41 \\ 26,78 \\ 33,92 \\ 20,41 \\ 25,45 \\ 20,06 \\ 26,76 \\ 18,42 \\ 27,97 \\ 23,72 \end{bmatrix},$$

$$X = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & -1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ 1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & -1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ 1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{3} & \frac{-2}{3} & \frac{-2}{3} \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{3} & \frac{-2}{3} & \frac{-2}{3} \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-2}{3} & \frac{1}{3} & \frac{-2}{3} \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-2}{3} & \frac{1}{3} & \frac{-2}{3} \\ 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-2}{3} & \frac{-2}{3} & \frac{1}{3} \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-2}{3} & \frac{-2}{3} & \frac{1}{3} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-2}{3} & \frac{-2}{3} & \frac{-2}{3} \end{bmatrix}.$$

По формуле 3.32 рассчитанные коэффициенты уравнения регрессии имеют значения:

$$B = \begin{bmatrix} 22,767 \\ 2,485 \\ 3,173 \\ 4,52 \\ 0,091 \\ 0,894 \\ 0,426 \\ 0,109 \\ -0,682 \\ -0,202 \\ -0,417 \end{bmatrix}.$$

Основные параметры регрессионного уравнения приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Параметры уравнения регрессии при $s = 0,3$ мм

Параметр		Значение параметра
1	2	3
1. Безразмерные коэффициенты	b_0	22,767
	b_1	2,485
	b_{11}	3,173
	b_{12}	4,52
	b_{13}	0,091
	b_2	0,894
	b_{22}	0,426
	b_{23}	0,109
	b_3	-0,682
	b_{33}	-0,202
	B_{123}	-0,417
2. Дисперсия воспроизводимости	$S_{\text{восп}}$	0,251
	$f_{\text{восп}}$	3

Продолжение таблицы 3.5

1	2	3
3. Расчетный критерий Стьюдента	t_0	351,295
	t_1	31,308
	t_{11}	6,894
	t_{12}	1,028
	t_{13}	10,071
	t_2	39,976
	t_{22}	2,04
	t_{23}	4,803
	t_3	56,946
	t_{33}	4,214
	t_{33}	1,225
	4. Критический критерий Стьюдента	$t_{кр}$
5. Дисперсия адекватности	$S^2_{ад}$	0,079
	$f_{ад}$	7
6. Критерий Фишера	$F_{расч}$	3,187
	$F_{кр}$	4,4

Критическое значение критерия Стьюдента $t_{кр}=3,18$

Если $t > t_{кр}$, то коэффициент считают значимым. Таким образом, коэффициенты b_4 , b_7 и b_9 считаются незначимыми и исключаются из уравнения регрессии. Уравнение регрессии примет вид:

$$y(x_1, x_2, x_3) = 22,767 + 2,485 \cdot x_1 + 3,173 \cdot x_2 + 4,52 \cdot x_3 + 0,894 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,426 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0,682 \cdot x_1^2 - 0,417 \cdot x_3^2, \quad (3.41)$$

Оценим адекватность уравнения регрессии. Число значимых коэффициентов $L=8$. Значения выходного параметра I_p в сравнении с исходными данными I :

Модель считаем адекватной, так как выполнено условие $F < F_{кр}$.

$$Ир = \begin{bmatrix} 13,543 \\ 16,725 \\ 19,036 \\ 22,219 \\ 19,943 \\ 26,7 \\ 27,141 \\ 33,899 \\ 20,332 \\ 25,302 \\ 20,326 \\ 26,672 \\ 18,562 \\ 27,602 \\ 23,449 \end{bmatrix} \cdot И = \begin{bmatrix} 13,58 \\ 16,78 \\ 19,02 \\ 22,15 \\ 20,07 \\ 26,41 \\ 26,78 \\ 33,92 \\ 20,41 \\ 25,45 \\ 20,06 \\ 26,76 \\ 18,42 \\ 27,97 \\ 23,72 \end{bmatrix}.$$

Переведем уравнение 3.41 в натуральный масштаб:

$$y(x_1, x_2, x_3) = 22,767 + 2,485 \cdot x_1 + 3,173 \cdot x_2 + 4,52 \cdot x_3 + 0,894 \cdot x_1 \cdot x_3 + \\ + 0,426 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0,682 \cdot x_1^2 - 0,417 \cdot x_3^2 \quad (3.42)$$

где

$$x_1(z_1) = \frac{z_1 - 2}{1}, \\ x_2(z_2) = \frac{z_2 - 70}{15}, \\ x_3(z_3) = \frac{z_3 - 2500}{500}.$$

Тогда,

$$y(z_1, z_2, z_3) = -13,883 + 0,743 \cdot z_1 + 0,0695 \cdot z_2 + 0,00983 \cdot z_3 + \\ + 0,00179 \cdot z_1 \cdot z_3 + \\ + 0,000568 \cdot z_2 \cdot z_3 - 0,682 \cdot z_1^2 - 0,00000167 \cdot z_3^2 \quad (3.43)$$

Или

$$И(t, T, n) = -13,883 + 0,743 \cdot t + 0,0695 \cdot T + 0,00983 \cdot n + 0,00179 \cdot t \cdot n + \\ + 0,0000568 \cdot T \cdot n - 0,682 \cdot t^2 - 0,00000167 \cdot n^2. \quad (3.44)$$

Построим поверхности отклика в диапазоне: $t=1 \dots 3$ мин, $T=55 \dots 85$ °С, $n=2000 \dots 3000$ мин⁻¹. На рисунке 3.46 изображена поверхность зависимости содержания изогумуллона от температуры при частоте вращения ротора и построенная на основании регрессионного уравнения:

$$I(T, n) = -17,792 + 0,0695 \cdot T + 0,0152 \cdot n + 0,0000568 \cdot T \cdot n - 0,00000167 \cdot n^2, \quad (3.45)$$

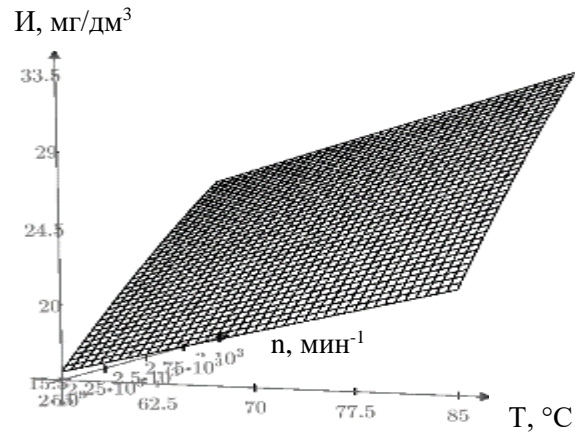


Рисунок 3.46 – Зависимость содержания изогумулона от температуры при частоте вращения ротора при $s=0,3$ мм

На рисунке 3.47 представлена поверхность зависимости содержания изогумулона от времени обработки и частоты вращения ротора, полученная по уравнению:

$$I(t, n) = -7,0255 + 0,743 \cdot t + 0,014658 \cdot n + 0,00179 \cdot t \cdot n - 0,695 \cdot t^2 - 0,00000167 \cdot n^2, \quad (3.46)$$

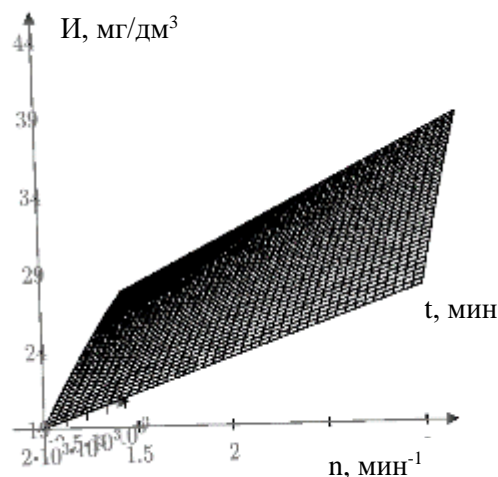


Рисунок 3.47 – Зависимость содержания изогумулона от времени и частоты вращения ротора при $s=0,3$ мм

На рисунке 3.48 приведена поверхность зависимости содержания изогумулона от времени обработки и температуры согласно уравнению:

$$I_3(t, T) = 0,577 + 6,113 \cdot t + 0,2399 \cdot T - 0,682 \cdot t^2, \quad (3.47)$$

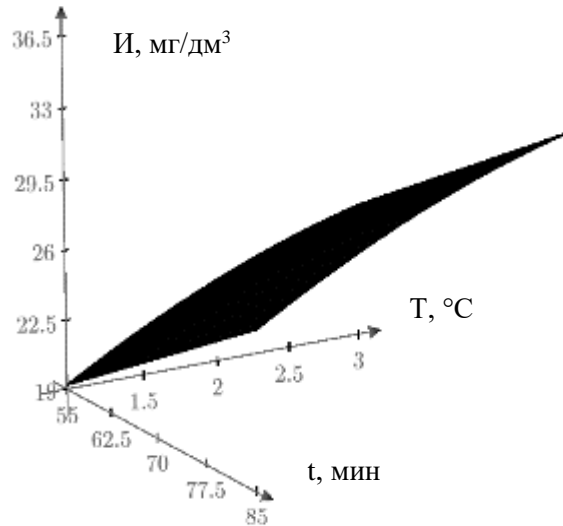


Рисунок 3.48 – Зависимость содержания изогумулона от времени и температуры при $s=0,3$ мм

Рассмотрим вариант регрессионного анализа для зазора $s=0,5$ мм. Дисперсия воспроизводимости определена по отдельной серии опытов и составляет $S_{\text{восп}}=0,251$. Число степеней свободы дисперсии воспроизводимости $f_{\text{восп}}=3$. Расчеты выполнены в среде MathCAD (Prime 4.0). При $k=3$; $\alpha=1$; $n_o=1$:

$$Y = \begin{bmatrix} 11,61 \\ 14,26 \\ 15,39 \\ 18,82 \\ 17,05 \\ 22,44 \\ 22,76 \\ 28,83 \\ 17,34 \\ 21,63 \\ 17,06 \\ 22,74 \\ 16,57 \\ 23,73 \\ 20,16 \end{bmatrix}.$$

$$X = \begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & -1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ 1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & -1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ 1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{3} & -\frac{2}{3} & -\frac{2}{3} \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{3} & -\frac{2}{3} & -\frac{2}{3} \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-2}{3} & \frac{1}{3} & -\frac{2}{3} \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-2}{3} & \frac{1}{3} & -\frac{2}{3} \\ 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-2}{3} & -\frac{2}{3} & \frac{1}{3} \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-2}{3} & -\frac{2}{3} & \frac{1}{3} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-2}{3} & -\frac{2}{3} & -\frac{2}{3} \end{pmatrix}$$

Рассчитанные коэффициенты уравнения регрессии по формуле 3.32 имеют значения:

$$B = \begin{bmatrix} 19,359 \\ 2,183 \\ 2,613 \\ 3,816 \\ 0,183 \\ 0,672 \\ 0,47 \\ -0,013 \\ -0,815 \\ -0,405 \\ -0,15 \end{bmatrix}$$

Основные параметры регрессионного уравнения приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Параметры уравнения регрессии при $s = 0,5$ мм

Параметр	Значение параметра	
1. Безразмерные коэффициенты	b_0	19,359
	b_1	2,183
	b_{11}	2,613
	b_{12}	3,816
	b_{13}	0,183
	b_2	0,672
	b_{22}	0,47
	b_{23}	-0,013
	b_3	-0,815
	b_{33}	-0,405
	B_{123}	-0,15
2. Дисперсия воспроизводимости	$S_{\text{восп}}$	0,251
	$f_{\text{восп}}$	3
3. Расчетный критерий Стьюдента	t_0	298,708
	t_1	27,503
	t_{11}	8,243
	t_{12}	2,057
	t_{13}	7,578
	t_2	32,92
	t_{22}	4,096
	t_{23}	5,296
	t_3	48,077
	t_{33}	1,517
	t_{123}	0,141
4. Критический критерий Стьюдента	$t_{\text{кр}}$	3,18
5. Дисперсия адекватности	$S^2_{\text{ад}}$	0,079
	$f_{\text{ад}}$	7
6. Критерий Фишера	$F_{\text{расч}}$	2,755
	$F_{\text{кр}}$	4,4

Критическое значение критерия Стьюдента $t_{\text{кр}}=3,18$.

Коэффициенты b_4 , b_7 и b_9 считаются незначимыми и исключаются из уравнения регрессии. Уравнение регрессии примет вид:

$$y(x_1, x_2, x_3) = 19,359 + 2,183 \cdot x_1 + 2,613 \cdot x_2 + 3,816 \cdot x_3 + \\ + 0,672 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,47 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0,815 \cdot x_1^2 - 0,405 \cdot x_2^2, \quad (3.48)$$

Критическое значение критерия Фишера согласно справочным таблицам $F_{кр}=4,4$. Модель считают адекватной, так как выполняется условие $F < F_{кр}$.

Переведем уравнение в натуральный масштаб:

$$y(x_1, x_2, x_3) = 19,359 + 2,183 \cdot x_1 + 2,613 \cdot x_2 + 3,816 \cdot x_3 + \\ + 0,672 \cdot x_1 \cdot x_3 + \\ + 0,47 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0,815 \cdot x_1^2 - 0,405 \cdot x_2^2 \quad (3.49)$$

где

$$x_1(z_1) = \frac{z_1 - 2}{1}, \\ x_2(z_2) = \frac{z_2 - 70}{15}, \\ x_3(z_3) = \frac{z_3 - 2500}{500}.$$

Тогда,

$$y(z_1, z_2, z_3) = -10,674 + 2,083 \cdot z_1 + 0,269 \cdot z_2 + 0,000557 \cdot z_3 + \\ + 0,001344 \cdot z_1 \cdot z_3 + \\ + 0,0000626 \cdot z_2 \cdot z_3 - 0,815 \cdot z_1^2 - 0,0018 \cdot z_2^2, \quad (3.50)$$

или

$$И(t, T, n) = -10,674 + 2,083 \cdot t + 0,269 \cdot T + 0,000557 \cdot n + \\ + 0,001344 \cdot t \cdot n + \\ + 0,0000626 \cdot T \cdot n - 0,815 \cdot t^2 - 0,0018 \cdot T^2. \quad (3.51)$$

Построим поверхности отклика в диапазоне: $t = 1 \dots 3$ мин, $T = 55 \dots 85$ °С, $n = 2000 \dots 3000$ мин⁻¹. На рисунке 3.49 изображена поверхность зависимости содержания изогумуллона от температуры при частоте вращения ротора и построена на основании регрессионного уравнения:

$$И_1(T, n) = -11,76 + 0,269 \cdot T + 0,004589 \cdot n + \\ + 0,0000626 \cdot T \cdot n - 0,0018 \cdot T^2, \quad (3.52)$$

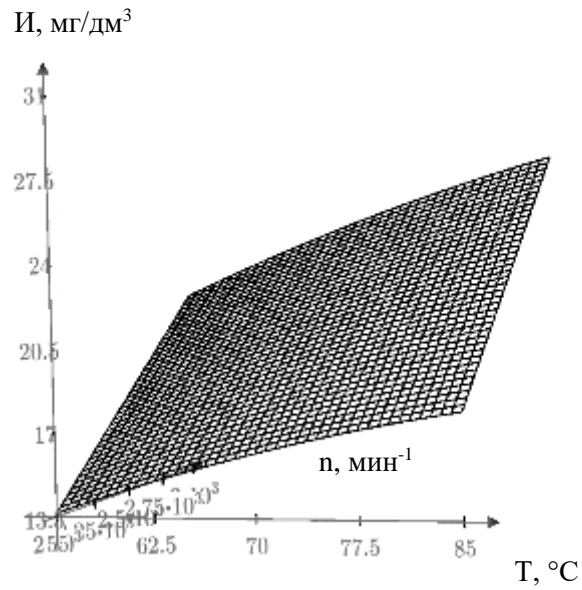


Рисунок 3.49 – Зависимость содержания изогумулона от температуры и частоты вращения ротора при $s = 0,5$ мм

На рисунке 3.50 представлена поверхность зависимости содержания изогумулона от времени обработки и частоты вращения ротора, полученная по уравнению:

$$\begin{aligned}
 I_2(t, n) = & -0,811 + 2,083 \cdot t + 0,005878 \cdot n + \\
 & + 0,001344 \cdot t \cdot n - 0,815 \cdot t^2,
 \end{aligned}
 \tag{3.53}$$

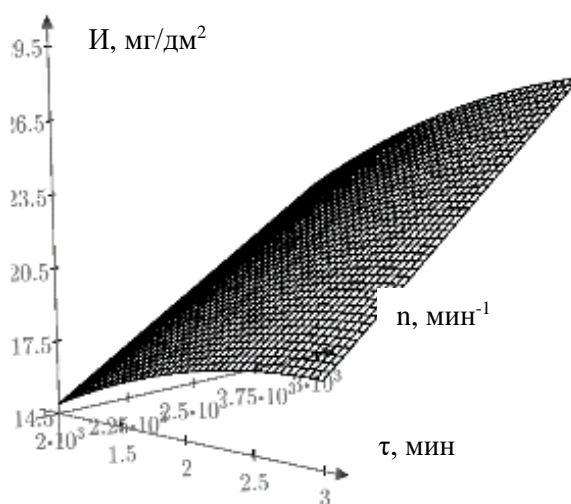


Рисунок 3.50 – Зависимость содержания изогумулона от времени и частоты вращения ротора при $s = 0,5$ мм

На рисунке 3.51 приведена поверхность зависимости содержания изогумулона от времени обработки и температуры согласно уравнению:

$$I_3(t, T) = -9,003 + 6,115 \cdot t + 0,4568 \cdot T - 0,815 \cdot t^2 - 0,0018 \cdot T^2, \quad (3.54)$$

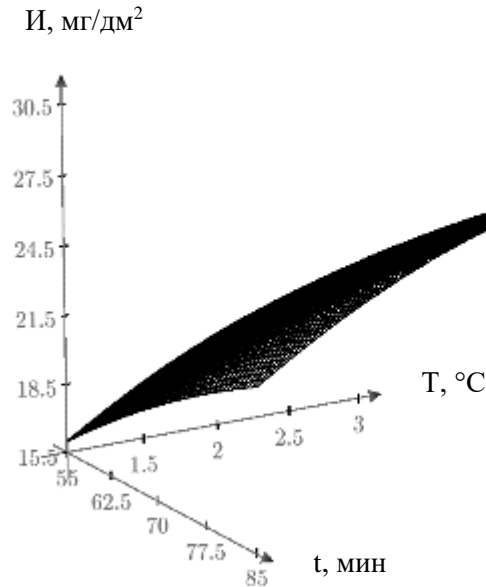


Рисунок 3.51 – Зависимость содержания изогумулона от температуры и времени при $s = 0,5$ мм

Получены уравнения регрессии, которые предсказывают значения содержания изогумулона при различных факторах эксперимента и на их основе построены поверхности отклика для наглядного представления выхода изогумулона от технических и технологических параметров РПА.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

1. Определены оптимальные параметры работы РПА и степень их влияния на выход горьких веществ хмеля: зазор $s=0,3$ мм, температура обрабатываемой среды, $T=85^{\circ}\text{C}$, частота вращения ротора $n=3000$ мин⁻¹, время обработки $\tau=3$ мин.

2. Установлено, что продолжительность обработки хмелевого экстракта в РПА оказывает максимальное воздействие на выход изогумулонов. При установленных оптимальных параметрах содержание изогумулонов в полученном хмелевом экстракте на основе пивного сусла составляет 33,92 мг/дм³. Пивное сусло, полученное на основе хмелевого экстракта, после охмеления имеет содержание изогумулона 64,44 мг/дм³. Содержание изогумулона в хмелевом экстракте, приготовленном на основе последних промывных вод составляет 33,53 мг/дм³. Содержание изогумулона в пивном сусле, приготовленном с использованием хмелевого экстракта на основе последних промывных вод составляет 63,7 мг/дм³.

3. Полученные уравнения регрессии, адекватно описывающие влияние технических параметров РПА на содержание изогумулонов в пивном сусле или хмелевом экстракте.

ГЛАВА 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В РОТОРНО-ПУЛЬСАЦИОННОМ АППАРАТЕ

В главе рассмотрены метод математического моделирования процесса охмеления пивного сусла с помощью роторно-пульсационного аппарата, с целью предсказания будущих результатов в заданных пределах на основе экспериментальных данных.

4.1 Кибернетический подход на основе структурно-параметрической идентификации

Распознавание динамических моделей является актуальной проблемой в современной науке и математические модели позволяют автоматизировать существующие процессы на промышленных производствах. Если для построения модели необходимо большое количество экспериментов, то кибернетический подход позволит создать модель с минимальным количеством вводных и экспериментальных данных.

Создание модели процесса на основе регрессионных уравнений, потребовало большого объема экспериментальных данных, поэтому моделирование процесса охмеления с применением структурно-параметрической идентификацией будет актуальным [93].

Линейный динамический объект описывается непрерывной передаточной функцией (НПФ):

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_2 s^2 + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_2 s^2 + a_1 s + a_0}, \quad (4.1)$$

где s – переменная преобразования Лапласа. Известно также модальное представление НПФ объекта:

$$G(s) = K \prod_{i=1}^m (s - s_i^0) / \prod_{i=1}^n (s - s_i), \quad (4.2)$$

где $K=b_m/a_n$, $s_1^0, s_2^0, \dots, s_m^0$ – нули НПФ, s_1, s_2, \dots, s_n – полюса НПФ.

Входное $x(t)$ и выходное $y(t)$ воздействия объекта могут быть представлены результатами измерений с некоторым временным шагом Δ : $x[0] = x(0\Delta)$, $x[1] = x(1\Delta)$, $x[2] = x(2\Delta)$, ... ; $y[0] = y(0\Delta)$, $y[1] = y(1\Delta)$, $y[2] = y(2\Delta)$, Тогда модель динамического объекта в цифровой форме с использованием преобразования $z = e^{s\Delta}$ имеет вид:

$$G(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{b_m z^{-m} + \dots + b_1 z^{-1} + b_0}{a_n z^{-n} + \dots + a_1 z^{-1} + 1}, \quad (4.3)$$

где $G(z)$ – дискретная передаточная функция (ДПФ) динамического объекта, $X(z)$, $Y(z)$ – z -преобразования числовых последовательностей значений входного и выходного воздействий. Дискретную модель объекта можно представить в форме конечно-разностного уравнения:

$$y(n\Delta t) = \sum_{i=0}^m b_i x[n-i] - \sum_{i=1}^n a_i y[n-i]. \quad (4.4)$$

Основной задачей структурно-параметрической идентификации динамического объекта является построение моделей (4.1 – 4.4) на основе измерений входного и выходного воздействий с шагом дискретизации Δ .

Чтобы построить модель объекта заносим измерения входного и выходного воздействия в матрицу-идентификатор (4.5), в строки № 0 и № 1:

	столбец № 0	столбец № 1	столбец № 2	столбец № 3	...
строка № 0	$x[0]$	$x[1]$	$x[2]$	$x[3]$...
строка № 1	$y[0]$	$y[1]$	$y[2]$	$y[3]$...
строка № 2	a_{20}	a_{21}	a_{22}	a_{23}	...
строка № 3	a_{30}	a_{31}	a_{32}	a_{33}	...
...

(4.5)

Остальные элементы матрицы-идентификатора находятся по формулам:

$$a_{m,k} = a_{m-2,k+1}/a_{m-2,0} - a_{m-1,k+1}/a_{m-1,0}, \quad (4.6)$$

$$a_{0,k} = x[k], a_{1,k} = y[k], k = 0, 1, 2, \dots$$

Расчет в матрице-идентификаторе останавливается, когда появляются строки с нулевыми элементами. Это и будет считаться критерием вычислительной операции на основе формулы (4.6). Значения столбца №0 в матрице (4.5) позволяют образовать непрерывную правильную C -дробь, аппроксимирующую ДПФ динамического объекта:

$$G(z) = \frac{a_{10}/a_{00}}{1 + \frac{a_{20}z^{-1}}{1 + \frac{a_{30}z^{-1}}{1 + \dots}}} \quad (4.7)$$

В случае $y[0] = 0$ строка № 1 матрицы сдвигается влево на один элемент. Для данной строки отрицательная степень переменной z увеличивается на единицу.

Непрерывная дробь (4.7) сворачивается в дробно-рациональное выражение, аналогичное (4.3), где определяют ее нули и полюса. Для преобразования модели объекта в форму НПФ (4.2) применим следующее соотношение:

$$s = (\ln |z| + i \arg z) / \Delta. \quad (4.8)$$

Далее находят коэффициент K согласно теореме о конечном значении основных свойств z -преобразования:

$$\lim_{z \rightarrow 1} G(z) = K. \quad (4.9)$$

Работоспособность метода структурно-параметрической идентификации осуществим, основываясь на апериодический объект 1-го порядка. НПФ примет следующий вид:

$$G(s) = \frac{K}{Ts+1}, \quad (4.10)$$

где T – постоянная времени, K – коэффициент усиления. Реакция объекта на единичное воздействие опишется разгонной характеристикой вида $h(t)$:

$$h(t) = K(1 - e^{-t/T}). \quad (4.11)$$

Зададим шаг дискретизации Δ и заполним матрицу-идентификатор:

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots \\ K(1 - e^{-\frac{\Delta}{T}}) & K(1 - e^{-\frac{2\Delta}{T}}) & K(1 - e^{-\frac{3\Delta}{T}}) & \dots \\ a_{20} & a_{21} & a_{22} & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots \end{pmatrix}. \quad (4.12)$$

№0-строка определяется значениями входного единичного воздействия. Для элементов строки №1 – значения разгонной характеристики (4.11), рассчитываются с шагом дискретизации Δ . По формуле (4.6) элементы строки №1 сдвинуты на один столбец влево. Элементы строки №2 считаются по следующей формуле:

$$a_{2k} = a_{0,k+1}/a_{00} - a_{1,k+1}/a_{10} = -e^{-\frac{\Delta}{T}} \cdot (1 - e^{-\frac{(k+1)\Delta}{T}})/(1 - e^{-\frac{\Delta}{T}}),$$

где

$$a_{20} = -e^{-\Delta/T}.$$

Элементы строки №3 равны $a_{3k}=0$. Появление строки с нулевыми значениями определяет ДПФ объекта:

$$G(z) = \frac{a_{01}/a_{00} \cdot z^{-1}}{1+a_{20}z^{-1}} = \frac{K1-e^{-\frac{\Delta}{T}}z^{-1}}{1-e^{-\Delta/T}z^{-1}}. \quad (4.13)$$

В ДПФ (4.13) нулей нет, полюс равен $z_1 = e^{-\Delta/T}$, что при переходе в z -плоскость дает $s_1 = -1/T$.

Крайний результат совпадает с полюсом объекта (4.11), следовательно,

модель динамического объекта (4.11) будет иметь вид:

$$G(s) = k \frac{1}{s+1/T} = \frac{kT}{Ts+1}.$$

Дискретная модель разгонной характеристики примет вид:

$$y[n] = e^{-\Delta/T} \cdot y[n-1] + K(1 - e^{-\frac{\Delta}{T}}) \cdot x[n-1]. \quad (4.14)$$

На рисунке 4.1 приведен анализ значений для разгонной характеристики (4.11) и ее дискретной модели (4.14) при $\Delta=1$, $K=2$, $T=1$. Из этого сделан вывод о высокой точности дискретной модели. Что она очень точно оценивает значения истинной разгонной характеристики объекта. Она может применяться для оценки состояния процесса объекта. Исходя из этого, на основе цифровых отсчетов входного и выходного воздействий апериодического звена 1-го порядка при помощи метода структурно-параметрической идентификации определена структура модели объекта (4.65), а также ее параметры.

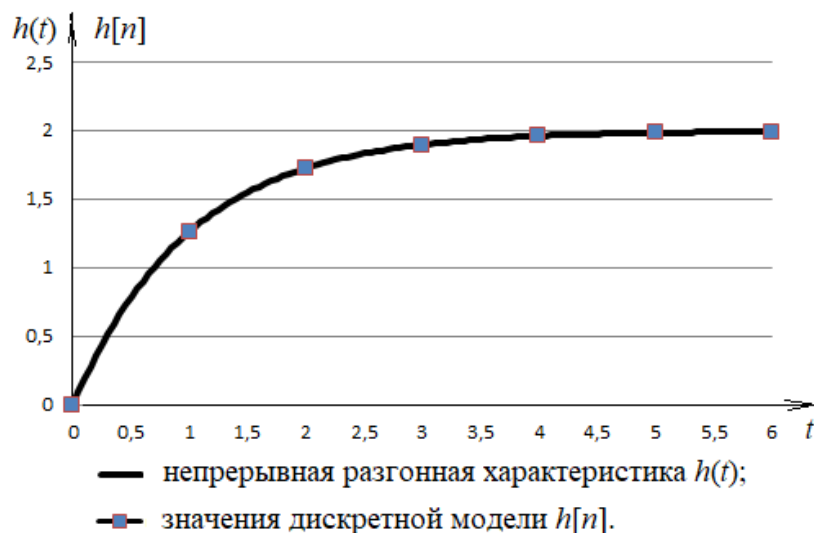


Рисунок 4.1 – Разгонная характеристика (4.11), значения ее дискретной модели (4.14)

Структурно-параметрическая идентификация для моделирования

процесса создания хмелевого экстракта. Разработка математической модели, способной максимально точно описать процесс создания хмелевого экстракта при помощи РПА, является актуальной задачей для пивоваренной промышленности. Созданная модель поможет подобрать необходимые параметры работы РПА, при максимален выход горьких веществ из хмеля. Создадим эту модель по вышеописанному методу.

Входным воздействием на РПА принято соотношение пивного сусла и гранулированного хмеля Magnum F . Воздействие на выходе РПА – показатель эффективности процесса – содержание изогумулонов в хмелевом экстракте I (мг/дм³). На процесс экстракции изогумулонов в пивное сусло оказывают влияние следующие параметры: температура среды t (°C), частота вращения ротора n (мин⁻¹) и зазор между ротором и статором s (мм). Для начала исследования примем значение зазора между ротором и статором $s = 0,5$ мм и построим модель процесса в зависимости от параметров температуры среды и частоты вращения ротора t и n , соответственно.

Возьмем начальные значения $t=55^\circ$, $n=2000$ мин⁻¹. Для создания модели представлены следующие экспериментальные данные для разгонной характеристики с шагом $\Delta = 1$ мин:

$$y[0] = 0; y[1] = 11,61; y[2] = 13,26; y[3] = 14,26; y[4] = 14,28; y[5] = 14,37.$$

Построим матрицу-идентификатор по формулам (4.5) и (4.6). Элементами нулевой строки является соотношение неохмеленного пивного сусла и гранулированного хмеля. Это значения входного воздействия равно 8 мг/л. К элементам первой строки относятся экспериментальные значения разгонной характеристики.

Иногда данные зашумлены, или объект отличается от линейного. Тогда расчеты прекращают при появлении строки, значения которой намного меньше значений предыдущих строк. Действуют также, если элементы строки имеют переменные знаки или значения элементов следующей строки матрицы резко возрастают. В таком случае добиться полного совпадения модельных и

экспериментальных данных не удастся.

$$\begin{pmatrix} 8 & 8 & 8 & 8 & 8 \\ 11,61 & 13,26 & 14,26 & 14,28 & 14,37 \\ -0,14186047 & -0,22825151 & -0,22997416 & -0,23772610 & \\ -0,46712557 & -0,39287782 & -0,44579998 & & \\ 0,76793205 & 0,66678213 & & & \\ -0,0272287 & & & & \end{pmatrix}$$

Здесь измерения производятся с допустимой ошибкой, достигающей 10%. Поэтому числа строки №5 идентифицирующей матрицы можно считать близкими к 0.

По формуле (4.7) получим непрерывную дробь:

$$G(z) = \frac{1,45125z^{-1}}{1 - \frac{0,14186047z^{-1}}{1 - \frac{0,46712557z^{-1}}{1 + 0,76793205z^{-1}}}}$$

После сворачивания дроби получим дробно-рациональное выражение для ДПФ:

$$G(z) = \frac{1,45125z^{-1} + 0,436546z^{-2}}{1 + 0,158946z^{-1} - 0,108939z^{-2}}. \quad (4.15)$$

В s -плоскость переводится только один полюс $z_1 = 0,260019$ выражения (4.15). Применим формулу перехода (4.8) и получим:

$$s_1 = -1,346999.$$

Тогда $T = 0,742391$. Определим коэффициент передачи по формуле (4.9):

$$\lim_{z \rightarrow 1} G(z) = \lim_{z \rightarrow 1} \frac{1,45125z^{-1} + 0,436546z^{-2}}{1 + 0,158946z^{-1} - 0,108939z^{-2}} = 1,797889.$$

Таким образом, мы определили значения параметров модели объекта, имея в

наличии только отсчеты его входного и выходного сигнала.

В итоге, НПФ примет вид:

$$G(s) = \frac{1,797889}{0,742391s+1}. \quad (4.16)$$

Из (4.71) построим конечно-разностное уравнение:

$$y[n] = -0,158946 \cdot y[n-1] + 0,108939 \cdot y[n-2] + 1,45125 \cdot x[n-1] + 0,436546 \cdot x[n-2]. \quad (4.17)$$

Аналогично получаются дискретные модели для $t=70^\circ$ (4.18) и $t=85^\circ$ (4.19).

Число оборотов ротора остается равным $n=2000$ мин⁻¹:

$$y[n] = -0,003202 \cdot y[n-1] + 0,095133 \cdot y[n-2] + 2,014875 \cdot x[n-1] + 0,062825 \cdot x[n-2]. \quad (4.18)$$

$$y[n] = -0,122653 \cdot y[n-1] + 0,114558 \cdot y[n-2] + 1,923750 \cdot x[n-1] + 0,473454 \cdot x[n-2]. \quad (4.19)$$

На рисунках 4.2 – 4.4 приведен сравнительный анализ графиков экспериментальной зависимости и построенных конечно-разностных уравнений (4.72-4.74).

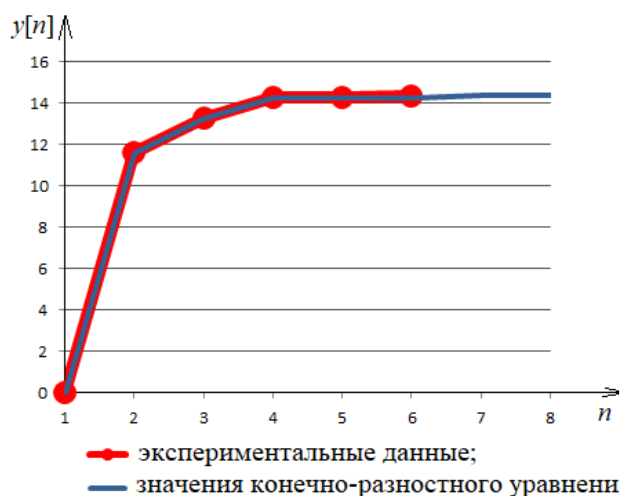


Рисунок 4.2 – Линейная аппроксимация исходных данных и полученной дискретной модели разгонной характеристики при $t = 55^\circ$ $n = 2000$ мин⁻¹



Рисунок 4.3 – Линейная аппроксимация исходных данных и полученной дискретной модели разгонной характеристики при $t = 70^\circ n = 2000 \text{ мин}^{-1}$



Рисунок 4.4 – Линейная аппроксимация исходных данных и полученной дискретной модели разгонной характеристики при $t = 85^\circ n = 2000 \text{ мин}^{-1}$

По рисункам видно, что построенные модели (4.17-4.19) позволяют точно оценить выходные значения процесса в течение всего времени. Ошибка определения установившегося значения по формулам (4.17), (4.18) и (4.19) составляет 0,01%, 0, 8% и 0,75% соответственно.

После сравнения результатов идентификации процесса охмеления пивного суслу с результатами идентификации апериодического звена 1-го порядка сделано предположение, что процесс экстракции обладает сложной структурой, а также не линеен. Результаты идентификации с другими значениями температур и частот вращения ротора представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1– Значения KiT при различных t и n для зазора $s = 0,5$ мм

K_{ij}		Частота вращения ротора n (мин ⁻¹)			T_{ij}		Частота вращения ротора n (мин ⁻¹)		
		$n_1 = 2000$	$n_2 = 2500$	$n_3 = 3000$			$n_1 = 2000$	$n_2 = 2500$	$n_3 = 3000$
Температура, t (°C)	$t_1 = 55$	1,97889	2,40594	2,88004	Температура, t (°C)	$t_1 = 55$	0,74239	0,88519	0,99470
	$t_2 = 70$	2,28804	2,74112	3,29878		$t_2 = 70$	0,84643	0,77206	0,83260
	$t_3 = 85$	2,37795	3,14188	3,63590		$t_3 = 85$	0,79142	0,81264	0,73892

Анализ данных таблицы 4.1 позволяет сделать вывод о нелинейной зависимости параметров K и T передаточной функции (4.10) от температуры и частоты вращения. Предположение о квадратическом виде зависимости $K = K(t, n)$ и $T = T(t, n)$ привело к построению моделей множественной регрессии второго порядка. Ошибки данной модели, найденные по 9 экспериментальным точкам, составили:

$$\sum (K_{ij} - K(t_i, n_j))^2 = 0,08, \quad \sum (T_{ij} - T(t_i, n_j))^2 = 0,02. \quad (4.20)$$

Однако анализ линейной аппроксимации поверхностей, построенных по данным таблицы 4.2 построенные рисунки 4.5 и 4.6 позволяют сделать следующий вывод. При значении $n = 2000$ мин⁻¹, сечение поверхности на рисунке 4.6 является выпуклой вверх кривой. В случае других значений параметра n сечения этой поверхности будут выпуклыми вниз кривыми. Сечения поверхности на рисунке 4.5, соответствующие трем значениям параметра n , также меняют выпуклость вверх на выпуклость вниз и обратно.

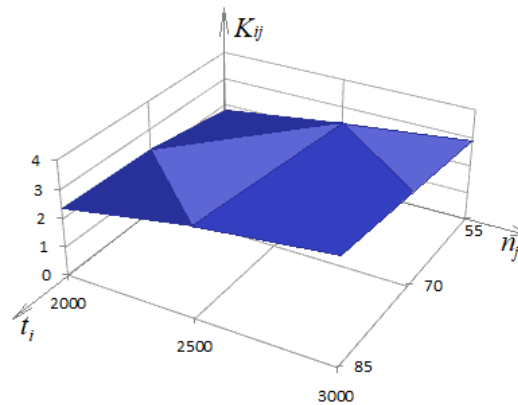


Рисунок 4.5 – Линейная аппроксимация зависимости параметра K от температуры t и частоты вращения n

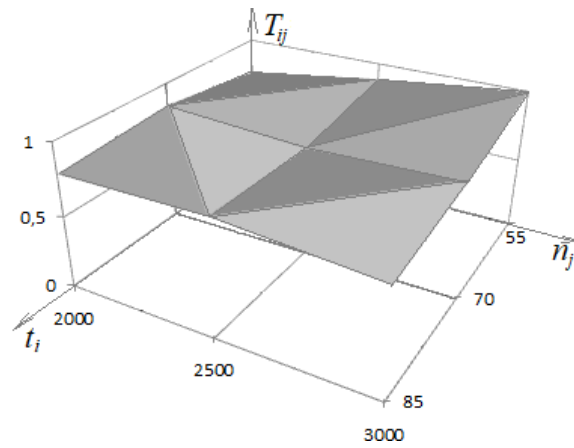


Рисунок 4.6 – Линейная аппроксимация зависимости параметра T от температуры t и частоты вращения n

Данный анализ зависимостей позволил предположить следующее. Более точное определение параметров K и T возможно, если описать зависимость уравнением третьего порядка.

Сделанные расчеты привели к формулам вида:

$$K = 5,03125 - 0,30150t + 1,23941n - 0,01391tn + 0,00520t^2 + 0,24156n^2 + 0,00037t^2n - 0,00632tn^2 - 0,00003t^3 - 0,00066n^3, \quad (4.21)$$

$$T = 3,71967 - 0,18400t + 0,93768n - 0,02979tn + 0,00331t^2 + 0,18912n^2 + 0,00023t^2n - 0,00267tn^2 - 0,00002t^3 + 0,00005n^3.$$

На рисунках 4.7 и 4.8 приведены поверхности, определяющие модельные зависимости параметров K и T , найденные по формулам (4.21).

Ошибки моделирования, нашли с помощью (4.20). Их значение равны:

$$\sum (K_{ij} - K(t_i \cdot n_j))^2 = 0,01, \quad \sum (T_{ij} - T(t_i \cdot n_j))^2 = 0,006.$$

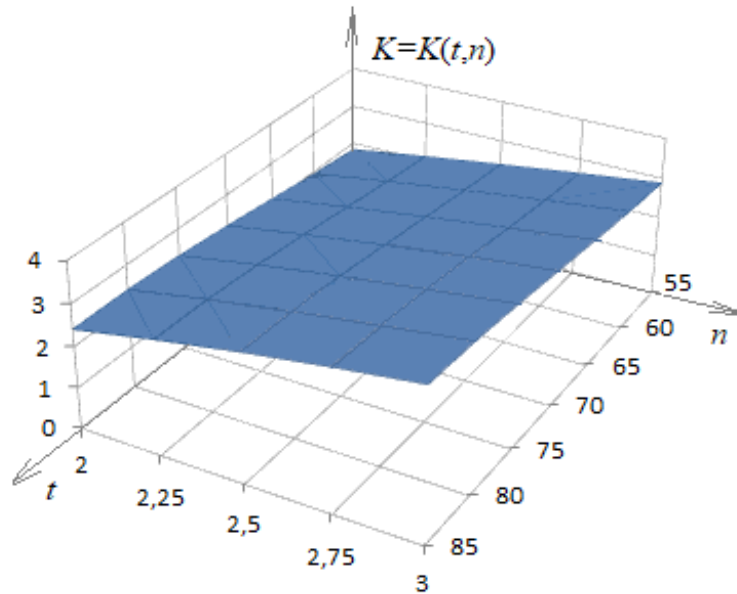


Рисунок 4.7 – График модельной зависимости параметра K от температуры t и частоты вращения n

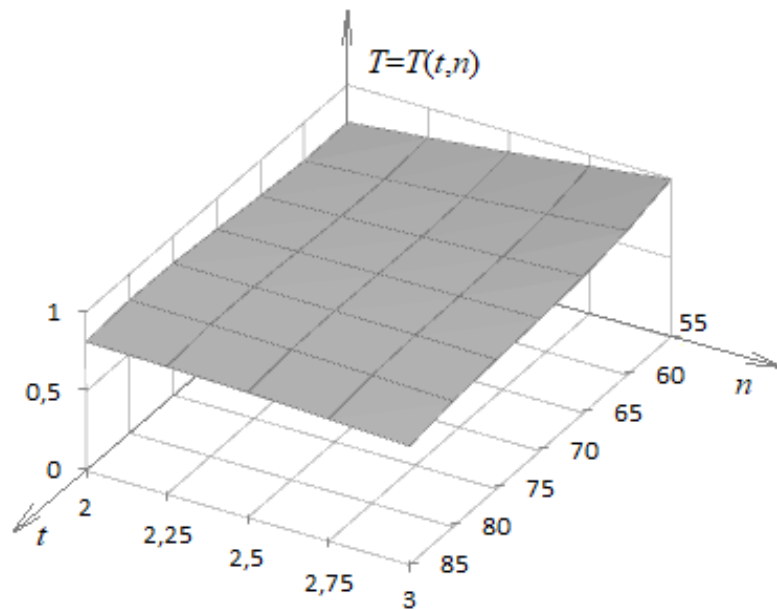


Рисунок 4.18 – График модельной зависимости параметра T от температуры t и частоты вращения n

В таблицах 4.2 и 4.3 приведены результаты идентификации параметров модели (4.10) для величины зазоров, равных 0,1 и 0,3 соответственно.

Таблица 4.2 – Значения K и T при различных t и n для зазора $s = 0,1$ мм

K_{ij}		частота вращения ротора n (1000 мин ⁻¹)			T_{ij}		частота вращения ротора n (1000 мин ⁻¹)		
		$n_1 = 2$	$n_2 = 2,5$	$n_3 = 3$			$n_1 = 2$	$n_2 = 2,5$	$n_3 = 3$
температура t (°C)	$t_1 = 55$	1,92847	2,55077	3,05019	температура t (°C)	$t_1 = 55$	0,97540	0,89799	0,99848
	$t_2 = 70$	2,29736	2,88719	3,49098		$t_2 = 70$	0,84920	0,73391	0,82794
	$t_3 = 85$	2,51468	3,24424	3,84874		$t_3 = 85$	0,79791	0,76095	0,73775

Таблица 4.3 – Значения K и T при различных t и n для зазора $s = 0,3$ мм

K_{ij}		частота вращения ротора n (1000 мин ⁻¹)			T_{ij}		частота вращения ротора n (1000 мин ⁻¹)		
		$n_1 = 2$	$n_2 = 2,5$	$n_3 = 3$			$n_1 = 2$	$n_2 = 2,5$	$n_3 = 3$
температура (°C)	$t_1 = 55$	2,15796	2,83608	3,38856	температура (°C)	$t_1 = 55$	1,02265	0,90090	0,99502
	$t_2 = 70$	2,56636	3,20929	3,87995		$t_2 = 70$	0,91164	0,73475	0,82919
	$t_3 = 85$	2,84952	3,60561	4,27938		$t_3 = 85$	0,94677	0,76104	0,74074

Аналогично (4.11) определим параметры множественной регрессии третьего порядка для $K(t, n)$ и $T(t, n)$ при величине зазора 0,1 мм:

$$K = 0,34860 - 0,04160t + 0,27041n + 0,02325tn + 0,00056t^2 + 0,09951n^2 + 0,00001t^2n - 0,00355tn^2 + 0,00001n^3, \quad (4.22)$$

$$T = 5,01717 - 0,16224t + 0,63489n - 0,03052tn + 0,00260t^2 - 0,3411n^2 + 0,00006t^2n + 0,0385tn^2 - 0,00001t^3.$$

Ошибки моделирования (4.20) равны:

$$\sum (K_{ij} - K(t_i, n_j))^2 = 0,003, \quad \sum (T_{ij} - T(t_i, n_j))^2 = 0,006.$$

Для величины зазора 0,3 мм значения $K(t, n)$ и $T(t, n)$ находятся по формулам:

$$K = -0,64714 + 0,01183t + 0,11421n + 0,02910tn - 0,00029t^2 + 0,09297n^2 - 0,00006t^2n - 0,00286tn^2, \quad (4.23)$$

$$T = 25,30386 - 1,19143t + 4,35791n - 0,19234tn + 0,02033t^2 + 0,76065n^2 - 0,00054t^2n + 0,05258tn^2 - 0,00009t^3 - 0,55064n^3.$$

Здесь ошибки моделирования равны:

$$\sum (K_{ij} - K(t_i, n_j))^2 = 0,003, \quad \sum (T_{ij} - T(t_i, n_j))^2 = 0,06.$$

Таким образом, модель процесса охмеления пивного сула на выходе РПА для параметров t, n ($55 \leq t \leq 85, 2 \leq n \leq 31$) описывается НПФ вида:

$$G(s) = \frac{K(t,n)}{T(t,n)s+1},$$

а разгонная характеристика определяется по формуле:

$$h(t) = K(t, n) \cdot (1 - e^{-t/T(t,n)}),$$

где значения $K(t, n)$ и $T(t, n)$ для величины зазора 0,5 мм определяются по формуле (4.21).

Значения $K(t, n)$ и $T(t, n)$ для зазоров, равных 0,1 мм и 0,3 мм, определяются по формулам (4.22) и (4.23) соответственно.

Проведен анализ экспериментальных данных процесса выхода изогумулонов в пивное сусло после обработки в РПА. Они удовлетворительно аппроксимируются разгонной характеристикой апериодического звена первого порядка. Совпадения полученных данных наблюдается в установившемся режиме. НПФ 1-го звена и содержат переменные коэффициенты, которые зависят от температуры среды и частота вращения ротора. Полученные уравнения (4.21-4.23) позволяют подобрать оптимальные физические параметры при заданных пределах для обработки смеси, при наибольшем выходе изогумулонов. Погрешности моделей составляют не более 6%. В инженерных расчетах допускается погрешность менее 10%, соответственно, полученные данные являются применимыми. Преимущества выбранного подхода основаны на том, что моделирование технологии не требует большого количества измерений и не нуждается в подборе пробных моделей.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

Разработана математическая модель на основе кибернетического подхода, описывающая процесс получения хмелевого экстракта, позволяющая осуществить выбор рациональных технологических параметров в заданных пределах для обрабатываемой среды, при которых выход изогумулонов максимален. Ошибки моделирования составили 0,6-6 %, что является допустимым для инженерных расчетов.

ГЛАВА 5. ПРОМЫШЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

В данной главе представлен разработанный новый способ охмеления пивного сусла с помощью РПА, который позволит интенсифицировать процесс производства пива. Проведена сравнительная дегустационная оценка опытного образца пива, полученного с применением РПА и образца пива, сваренного по классической технологии.

5.1 Новый способ охмеления пивного сусла

В процессе производства пива одним из основных технологических этапов является охмеление пивного сусла. При кипячении достигается растворение компонентов хмеля, а именно ароматических и горьких веществ, инактивация ферментов, упаривание, стерилизация сусла коагуляция белков [65, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91].

Для технологии производства пива особой важностью обладают такие компоненты хмеля, как хмелевое масло, смолы, дубильные и горькие вещества. Горькие вещества α -кислот в холодном сусле не растворяются, а в кипящем сусле структура α -кислот претерпевает перестройку – изомеризацию и превращаются в легко растворимые соединения – изомеризованные гумулоны, которые обладают горьким привкусом. Также горечь обусловлена количеством хмелевых смол, которое зависит от степени измельчения хмеля. На стадии кипячения в большем количестве выделяются изогумулоны и хмелевые смолы, горечь готового пива зависит от длительности и интенсивности кипячения. Горечь пива также обусловлена степенью отделения изо- α -кислот взвесью горячего сусла (с определенной плотностью) и от кислотного показателя. В настоящее время, на производстве применяется классический способ охмеления пивного сусла, характеризующийся длительным кипячением с большими энергозатратами.

Применение в производстве пива РПА позволит получить следующие преимущества, по сравнению с охмелением пивного сусла классическим способом:

1) сокращение времени кипячения сусла с хмелем в сушварочном котле, что значительно снижает вероятность карамелизации и затем пригорание сусла, исключая появления дополнительного карамельного аромата;

2) повышение эффективности кипячения в сушварочном котле, что снижает содержание диметилсульфида, являющегося основным источником запаха вареных овощей в пиве;

3) равномерное распределение частиц хмеля в сусле, что снижает вероятность их пригорания к стенкам сушварочного котла. Частицы старого жженого хмеля снижают органолептическое качество пива, придавая грубый жженный вкус и запах мыла.

Предлагаемый способ охмеления пивного сусла может быть осуществлен следующим образом. Для этого в РПА с рабочим объемом 1 дм³ загружается смесь пивного сусла, в количестве 0,8 дм³, с гранулированным хмелем, массой 0,024 кг [65]. Проводят обработку смеси в течение 3 минут при температуре 85 °С, частоте вращения ротора 3000 мин⁻¹ (314,16 с⁻¹) и зазоре между ротором и статором 0,3 мм. Под действием центробежных сил, материальный поток движется через зубья ротора и статора. Затем, во внешней рабочей области аппарата поток направляется в его нижнюю часть, где за счет насосного эффекта проходит через отверстия в ступице ротора и снова попадает в зазор между ротором и статором. Благодаря механическим воздействиям РПА на твердую фазу гранулированного хмеля за счет срезающих и истирающих нагрузок, а также развитой турбулентности, пульсациям давления и скорости потока жидкости улучшается ее растворимость. Этот процесс происходит, как снаружи гранул хмеля, так и внутри, что приводит к их интенсивному взаимодействию с пивным суслом. В результате перекрытия пазов ротора и статора появляются чередующиеся зоны сжатия и расширения. За счет этого в жидкой фазе появляются области разрыва - кавитационные зоны, образующие пузырьки, которые схлопываются с силой в несколько сот атмосфер, вследствие чего возникают ударные волны. Данное воздействие приводит к

интенсивному диспергированию частиц хмеля и увеличивает поверхность взаимодействия контактных фаз. Многократное колебание частиц твердой фазы в местах трения приводит к повышению температуры сусла, и как следствие влияет на увеличение коэффициента внутренней диффузии. Для поддержания необходимой температуры обрабатываемой среды (85°C) в РПА используется тепловая рубашка.

Положительный эффект от применения предлагаемого способа охмеления заключается в увеличении выхода изогумулонов из хмеля, что в свою очередь интенсифицирует процесс комплексообразования и осаждения белков в пивном сусле. В свою очередь, стабилизация химического состава пивного сусла в отношении высокомолекулярных соединений будет способствовать получению стабильной коллоидной системы готового пива [97, 98, 99].

5.2 Внедрение нового способа охмеления пивного сусла с помощью РПА в производство пива

Увеличение содержания изогумулонов в образцах сусла, охмеленного хмелевым экстрактом, полученным в РПА, позволяет сократить расход хмеля в 2 раза. В приложении Л изображена машинно-аппаратурная схема производства пива с внедрением в нее РПА для совершенствования стадии охмеления пивного сусла. Часть сусла после фильтрования отбирается в РПА для приготовления хмелевого экстракта, который затем вносится в сушеварочный котел.

Охмеленное сусло довели до содержания сухих веществ $C_{\text{сух}}=11\%$ масс. при помощи исправленной воды, а затем добавили пивоваренные дрожжи. Брожение проводилось при соблюдении всех технологических и производственных условий. Получен акт испытаний РПА в технологической линии по производству пива в ООО «Бавария».

Оценка качественных показателей пива, полученного из охмеленного сусла предложенным способом, производилась в условиях производственной лаборатории ООО «Бавария», д. Калинкино, Кемеровская область. Определение органолептических показателей осуществлялись согласно ГОСТ 31711-2012 «Пиво. Общие технические условия» по следующим показателям: прозрачность, цвет, аромат, вкус, хмелевая горечь, пена и насыщенность. Физико-химические показатели полученного пива представлены в Приложении И [92, 94, 95].

Органолептическая оценка пива осуществляется по 25-бальной шкале с использованием стандартного перечня терминов.

Оценка производственной дегустационной комиссии (приложение Ж), созданной на ООО «Бавария» показала, что применение РПА на стадии охмеления пивного сусла положительно повлияло на органолептические показатели готового пива. Предлагаемый способ охмеления может быть внедрен в технологический процесс производства пива.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 5

1. Разработан новый способ охмеления пивного сусла (патент РФ № 2634870, Приложение К), позволяющий интенсифицировать стадию охмеления, а именно сократить продолжительность технологической операции в 1,5 – 2 раза по сравнению с классическим способом, увеличить выход горьких веществ хмеля (изогумулонов) в 2,07 раза.

2. Проведены опытно-промышленные испытания РПА в составе технологической линии производства пива ООО «Бавария» на стадии охмеления. Оценка органолептических показателей двух образцов пива, сваренных по классической схеме и с применением РПА показала, что пиво, приготовленное с применением РПА обладает более насыщенным ароматом и хмелевой горечью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Научно обоснован способ охмеления пивного сусла с применением РПА, который позволяет добиться однородности смешения хмеля с пивным суслом и промывными водами, ускоряет протекание процессов экстрагирования изогумулонов за счет генерирования в них гидромеханической кавитации и упругих колебаний.

2. Исследован процесс охмеления пивного сусла с применением хмелевого экстракта, полученного на основе пивного сусла и промывных вод, после обработки в РПА. Установлено, что в хмелевом экстракте на основе пивного сусла содержание изогумулонов составляет 33,92 мг/дм³. Пивное сусло, полученное на основе хмелевого экстракта, после охмеления имеет содержание изогумулона 64,44 мг/дм³. Содержание изогумулона в хмелевом экстракте, приготовленном на основе последних промывных вод составляет 33,53 мг/дм³. Содержание изогумулона в пивном сусле, приготовленном с использованием хмелевого экстракта на основе последних промывных вод составляет 63,7 мг/дм³.

3. Определены рациональные параметры работы РПА и степень их влияния на выход горьких веществ хмеля: зазор $s=0,3$ мм, температура обрабатываемой среды, $T=85^{\circ}\text{C}$, частота вращения ротора $n=3000$ мин⁻¹, время обработки $\tau=3$ мин.

Установлено, что продолжительность обработки хмелевого экстракта в РПА оказывает максимальное воздействие на выход изогумулонов. Получены уравнения регрессии, адекватно описывающие влияние исследуемых технических параметров РПА на содержание изогумулонов в пивном сусле или хмелевом экстракте.

4. Разработана математическая модель на основе кибернетического подхода, описывающая влияние режимов работы РПА на содержание изогумулонов в пивном сусле или хмелевом экстракте, позволяющая осуществить выбор рациональных параметров обработки.

5. Разработан новый способ охмеления пивного сусла (патент РФ № 2634870), позволяющий сократить продолжительность технологической операции

в 1,5 – 2 раза по сравнению с классическим способом и увеличить выход горьких веществ хмеля (изогумулонов) в 2,07 раза.

6. Проведены опытно-промышленные испытания РПА в составе технологической линии производства пива на ООО «Бавария». Оценка органолептических показателей образцов пива, сваренных по классической схеме и с применением РПА показала, что пиво, приготовленное по новому способу, обладает более насыщенным ароматом и хмелевой горечью.

Список литературы

1. Петров, А. М. Пивоваренная отрасль сегодня / А.М. Петров // Пиво и напитки. – 2004. - № 4. - С. 54-56.
2. ГОСТ 31711-2012 Пиво. Общие технические условия. Введ. 2013.01.07. – Москва: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 2013. – 9 с.
3. Балашов, В. Е. Техника и технология производства пива и безалкогольных напитков / В. Е. Балашов, В. В. Рудольф. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. – 248 с.
4. ГОСТ Р 51174-98. Пиво. Общие технические условия. – Введ. 1999.01.07. – Москва: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 1999. – 12 с.
5. Борисенко, Т. Н. Технология отрасли. Технология пива [Текст]: учебное пособие. / Т.Н. Борисенко. — Кемерово: КемТИПП, 2007. — 136 с.
6. Калунянц, К. А. Химия солода и пива / К. А. Калунянц. – М.: Агропромиздат, 1990. – 176 с.
7. Косминский, Г. И. Технология солода, пива и безалкогольных напитков / Г. И. Косминский. – Мн.: Дизайн ПРО, 1998. – 352 с.
8. Нечаева, А. П. Пищевые ингредиенты в создании современных продуктов питания / В. А. Тутельяна, А. П. Нечаева. – М.: ДеЛи плюс, 2014. – 520 с.
9. Хорунжина, С. И. Биохимические и физико-химические основы технологии солода и пива / С. И. Хорунжина. – М.: Колос, 1999. – 312 с.
10. Борисенко, Т. Н. Технология отрасли. Технология пива / Т.Н. Борисенко, М. В. Кардашева. – Кемеровский технологический институт пищевой промышленности. – Кемерово, 2014. – 122 с.
11. Хорунжина, С. И. Химия солодовенного и пивоваренного производств: учебное пособие / С. И. Хорунжина. – Кемерово: КемТИПП, 2006. – 124 с.
12. ГОСТ Р 52061-2003 Солод ржаной сухой. Технические условия. – М.: Стандартиформ, 2006 – 24 с.
13. ГОСТ 29294-2014 Солод пивоваренный. Технические условия. – М.: Стандартиформ, 2014. – 25 с.

14. Джамалова, Г. А. Основы биотехнологического производства для студентов КазНТУ имени К.И. Сатпаева для специальности 050701 Биотехнология: учебно-методический комплекс / Г.А. Джамалова, С.С. Нуркеев. – / Алматы: КазНТУ, 2009. - 62 с.

15. Борисенко, Т. Н. Методы исследования качества сырья, полуфабрикатов и готовой продукции бродильных производств. В 3 ч. Ч. 3. Технология пива и безалкогольных напитков / Т. Н. Борисенко, Т. И. Нуштаева. – Кемерово, КемТИПП, 2003. – 104 с.

16. Танганов, Б. Б. Химические методы анализа: Учебное пособие/ Б.Б.Танганов - ВСГТУ. – Улан-Удэ. – 2005. – 550 с.

17. Киселёва, Т. Ф. Методы исследования качества сырья, полупродуктов и готовой продукции бродильных производств. В 2 ч. Ч. 1. Анализ сырья бродильных производств / Т. Ф. Киселева, Л. В. Пермякова. – Кемерово: КемТИПП, 2001. – 68 с.

18. ГОСТ Р 2874-82. Вода питьевая. Гигиенические требования и контроль за качеством. – Введ. 1982.18.10. – Москва: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 1999. – 10 с.

19. Кунце, В. Технология солода и пива / В. Кунце. – СПб.: Профессия, 2003. – 912 с.

20. Нарцисс, Л. Краткий курс пивоварения: [пер. с нем.] / Л. Нарцисс, В. Бак // пер. с нем. А. А. Куреленкова. – СПб.: Профессия, 2007. – 658 с.

21. Кунце, В. «Правильное пиво» - и как его сварить. Методы удаления спирта из пива / В. Кунце // Пиво и напитки. - 2001. - № 4. - С.22-24.

22. Меледина, Т. В. Сырьё и вспомогательные материалы в пивоварении / Т. В. Меледина. – СПб.: Профессия, 2003. – 304 с.

23. Васянина, С.А. Анализ напитков уксусно-этилового брожения методом газо-жидкостной хроматографии. /Васянина С. А., А. М. Мирошников // Пиво и напитки. – 2008. - №2. -С. 31–50.

24. Сизова, Л. С. Рефрактометрический метод анализа, методические указания к лабораторным работам / Л. С. Сизова. – Кемерово, КемТИПП. – 1993. – 32 с.

25. Сорокопуд, А. Ф. Аспекты деалкоголизации пива термическим методом /А. Ф. Сорокопуд, А. В. Миленский // Продукты питания и рациональное использование сырьевых ресурсов: сб. науч. Работ. – Кемерово. – 2006. - Вып. 11. С. – 38-40.

26. Косминский, Г. И. Состав летучих компонентов безалкогольного пива, полученного в процессе аэрации / Г. И Косминский. Е. М Моргунова // Пиво и напитки. – 2007. - №3. - С. 13-16.

27. Плаксин, Ю. М. Процессы и аппараты пищевых производств / Ю. М. Плаксин, Н. Н. Малахов, В. А. Ларин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: КолосС, 2007. – 760 с.: илл.

28. Машины и аппараты пищевых производств: Учеб. для вузов.: В 2 кн. Кн. 2 / С. Т. Антипов, И. Т. Кретов, А. Н. Остриков и др.; Под ред. В. А. Панфилова. - М.: Высш. шк., 2001.-680 с.

29. Ермолаева, Г. А. Технология и оборудование производства пива и безалкогольных напитков: учеб. для нач. проф. образования / Ермолаева Г. А., Колчева Р. А. – М.: ИРПО; Изд. Центр Академия, 2000. – 416 с.

30. Каданер, Я. Д. Перспективы применения электрофизических воздействий в технологии пива и безалкогольных напитков. Обзорная информация. Серия 22. Пивоваренная и безалкогольная промышленность // Я. Д. Каданер, В. З. Вадачкория – М.: АгрНИИТЭИПП, 2009. – Вып. 3. – 28 с.

31. Ежов, И. С. Хмель и хмелевые препараты в пивоварении / И. С. Ежов и др. – М.: Легкая и пищевая промышленность. - 2010. – 168 с.

32. Пат. №208625. СССР, МПК С 12 С. Способ охмеления пивного сусла / Пехов А. В., Пономаренко И. Я., Прокопчук А. Ф., Разинков П. Ф., Мизуренкова Р. С., Волкович Н. М., Юрист Л. И. // Оpubл. 17.01.1968, Бюл. № 4.

33. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии Текст. / А. Г. Касаткин. М.:ОООТИД Альянс, 2004. -753 с.

34. Пат. №208625. СССР, МПК С 12 С. Способ охмеления пивного сусла/ Пехов А. В., Пономаренко И. Я., Прокопчук А. Ф., Разинков П. Ф., Мизуренкова Р. С., Волкович Н.М., Юрист Л.И.// Оpubл. 17.01.1968, Бюл. № 4.

35. Дытнерский, Ю. И. Процессы и аппараты химической технологии: учебное пособие / Ю. И. Дытнерский. – М.: Химия, 2012.-416 с.

36. Пат. № 2043400 Российская Федерация, МПК С12С 7. Способ охмеления пивного сусла / Чумак Т. И., Василенко О. М., Мищенко Л. Т., Михайленко Г. С., Федорова С. С.; заявитель и патентообладатель Украинский научно-исследовательский институт напитков; заявл. 10.12.1990; опубл. 10.09.1995.

37. Пат. СССР № 1751186. С12С9/02. Способ кипячения пивного сусла / Ю. В. Артомонов, В. Н. Бурмистров. // Опубл. 19.06.1990.

38. Пат. Российская Федерация № 2385901. С12С7/00. Способ охмеления пивного сусла / Марзоев А. И., Кручко Е. К., Марзоева А. А., Бязров В. В.; заявитель и патентообладатель ООО «Хмель Кавказа»; заявл. 07.06.2006; опубл. 10.04.2010.

39. Федоренко, Б. Н. Пивоваренная инженерия. Технологическое оборудование отрасли: учеб. для вузов / Б. Н. Федоренко. – СПб.: Профессия, 2009. – 1016 с.

40. Арсеньева, Т. П. Разработка пивоподобного напитка на основе пермеата молочной сыворотки / Т. П. Арсеньева, Е. В. Борздая, О. Н. Стрижнева // НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. – 2015. – № 3. – С. - 136-141.

41. Чупин, А. В. Автоматизация технологических процессов и производств / А. В. Чупин, С. Г. Пачкин. – Кемерово: КемТИПП, 2003.

42. Остриков, Ю. В. Процессы и аппараты пищевых производств / А. Н. Остриков, Ю. В. Красовицкий, А. А. Шевцов. – СПб.: ГИОРД, 2007. – 1312 с.

43. Сорокопуд, А. Ф. Исследование физико-химических свойств пива и пивного сусла / А. Ф. Сорокопуд., А. В. Миленький; КемТИПП. – Кемерово, 2008. 210 с. – Деп. в ВИНТИ 15.07.2008 № 615.

44. Сорокопуд, А. Ф. Теплофизические характеристики пива и пивного сусла / А. Ф. Сорокопуд, А. В. Миленький // Пиво и напитки. – 2008. - № 1. С. 22–50.

45. Бэмфорт, Ч. Новое в пивоварении / Ч. Бэмфорт. – СПб. :Издательство Профессия, 2007. - 520 с.

46. Сорокопуд, А. Ф. О способах получения безалкогольного пива / А. Ф.

Сорокопуд, А. В. Миленский // Продукты питания и рациональное использование сырьевых ресурсов: сб. науч. работ / КемТИПП. – Кемерово, 2005. - Вып. 10. С. – 120-121.

47. Миленский, А. В. Анализ способов концентрирования пивного суслу / А. В. Миленский // Пищевые продукты и здоровье человека: тез. докладов 6-ой региональной. науч. конф. студ. и аспирантов КемТИПП / КемТИПП. - Кемерово, 2006. - С.77-78.

48. Лобода, П. П. Исследование массоотдачи от твердых тел к жидкости в аппаратах с вибрирующими устройствами: дисс. канд. техн. наук. – Киев, 1966. – 154 с.

49. Маргулис, М. А. Основы звукохимии. Химические реакции в акустических полях / М. А. Маргулис. – М.: Высшая школа, 1984. – 270 с.

50. Лысянский, В. М. Аналитические и экспериментальные исследования экстракции растворимых веществ из ткани растительного сырья в процессах и аппаратах пищевых производств: дисс. ... док. техн. наук. – Киев, 1969. – 586 с.

51. Иванец, В. Н. Исследование пенообразующих свойств молока при обработке в роторно-пульсационном аппарате / В. Н. Иванец, Г. Е. Иванец, Е. А. Светкина // Техника и технология пищевых производств. – 2012. – №2. – С. 102-106.

52. Иванец, В. Н. Интенсификация процессов гомогенизации и диспергирования при получении сухих, увлажненных и жидких комбинированных продуктов / В. Н. Иванец, И. А. Бакин, Г. Е. Иванец // Техника и технология пищевых производств. – 2012. – №3. – С. 26-38.

53. Промтов, М. А. Пульсационные аппараты роторного типа / М. А. Промтов. – М.: Изд-во Машиностроение, 2001. – 247 с.

54. Сафонова, Е. А. Разработка и исследование роторно-пульсационного аппарата при получении жидких комбинированных продуктов питания: дис. ... канд. техн. наук. – Кемерово, 2003. – 185 с.

55. Пат. 2190462 РФ, МКИ 7 B01F 7/28. Роторно-пульсационный аппарат /Иванец В.Н., Иванец Г.Е., Афанасьева М.М., Сафонова Е.А., Артемасов В.В.// Оpubл. 10.10.2002, Бюл. №28.

56. Пат. № 2257257 РФ, МПК В01F 7/28 В01F 7 / Многосекционный роторно-пульсационный аппарат / Грунич С. В., Иванец Г. Е., Артемасов В. В., Аверкин С. В., Светкина Е. А. // опубл. 27.07.2005, Бюл. № 7.

57. Пат. № 2397793 РФ, МПК В01D 11/02 D01F 7/00 / Роторно-пульсационный экстрактор с направляющими лопастями / Потапов А. Н., Светкина Е. А., Попик А. М., Просин М. В. // опубл. 27.08.2010, Бюл. № 24.

58. Пат. 2186606 Россия, МКИ 7 В 01 D 11/02 Массообменный аппарат / Иванец В. Н., Потапов А. Н., Шушпанников А. Б., Судницын А. В. // Оpubл. 10.08.2002, Бюл. № 22.

59. Фараджева Е. Д., Федоров В. А. Прогрессивные методы интенсификации технологических процессов пивоварения. Воронеж 2007-122 с.

60. Иванец, В. Н. Процессы и аппараты пищевых производств: Учебное пособие / С. А. Ратников, И. А. Бакин, В. Н. Иванец – Кемерово: Кемеровский технологический институт пищевой промышленности, 2004. – 180 с.

61. Кавецкий, Г. Д. Процессы и аппараты пищевой технологии / Б.В. Васильев, Г. Д. Кавецкий – 2-е изд., перераб. и доп. – М: Колос, 2000. – 551 с.

62. Пат. № 2299091 РФ, И01F3/08, В01F7/28. Роторно-пульсационный аппарат для получения преимущественно систем «жидкость - жидкость» / Сакович Г. В., Василишин М. С., Карпов А. Г. // Оpubл. 20.05.2007.

63. Пат. РФ № 2309791. В01F7/28. В01F7 Роторно-пульсационный аппарат с направляющими лопастями / С. В. Грунич, Е. А. Светкина, А. З. Ядута. Г. Е. Иванец.

64. Светкина, Е. В. Разработка и исследование многосекционного роторно-пульсационного аппарата для производства аэрированных продуктов питания: дис. канд. техн. наук. – Кемерово, 2006. – 164 с.

65. Пат. № 2634870 РФ, МПК С12 С3/12. Способ охмеления пивного сусла/ Лапина Т. П., Бородулин Д. М., Миленький И. О., Сафонова Е. А., Иванец В. Н.// Оpubл. 07.11.2017.

66. Грачёв, Ю. П. Математические методы планирования экспериментов / Ю. П. Грачёв. – М.: Пищевая промышленность, 1979. –200 с.

67. Тубольцев, В. К. Алгоритм и программа обработки экспериментальных данных методом Брандона / В. К. Тубольцев, А. К. Тубольцев, Г. М. Нейгауз // Труды ВНИЭКИ продмаша. – 1979. - № 3. – С. 45.

68. Кругликов, Б. В. Применение ЭХА – растворов для экстракции горьких веществ хмеля / Б. В. Кругликов, М. В. Гернет // Пиво и напитки – 2011. - №1. – С.6-8.

69. Мелентьев, А. Е. Влияние хмеля на режим охмеления сусла и качество пива / А. Е. Мелентьев, Т. А. Михненко, Т. И. Семенова // Ферментативная и спиртовая промышленность. – 1987. - № 6. – С. 35 – 37.

70. Помозова, В. А. Производство кваса и безалкогольных напитков: учебное пособие /В. А. Помозова. - СПб: ГИОРД, 2006. – 192 с.

71. Потапов, А. Н. Разработка экстракторов для системы твердое тело – жидкость / А. Н. Потапов, М. В. Просин, А. М. Магилина, М. В. Понамарева // Техника и технология пищевых производств. – 2013. – № 3 (30). – С. 80-85.

72. Потапов, А. Н. Интенсификация процесса экстрагирования в роторно-пульсационном аппарате новой конструкции / А. Н. Потапов, М. В. Просин, А. М. Магилина, У. С. Потитина // Известия высших учебных заведений Пищевая технология. – 2013. – № 1 (331). – С. 97-99.

73. Баланов, П. Е. Технология бродильных производств / Баланов П.Е. Учебно-методическое пособие Санкт-Петербург, 2013.

74. Борисенко, Т. Н. Методы исследования качества сырья, полуфабрикатов и готовой продукции бродильных производств. В 3 ч. Ч. 3. Технология пива и безалкогольных напитков / Т. Н. Борисенко, Т. И. Нуштаева. – Кемерово, КемТИПП, 2003. – 104 с.

75. Борисенко, Т. Н. Методы исследования качества сырья, полуфабрикатов, и готовой продукции бродильных производств: учебное пособие для вузов / Т. Н. Борисенко. - Кемерово, 2003. –190 с.

76. Аксенова, З. Н. Влияние полифенольных соединений хмеля на физико – химические показатели и коллоидную стойкость пива / З. Н. Аксенова, Г. Н. Линенцкая, Л. В. Будко, С. С. Федорова, М. М. Кожухарь, Д. С. Шмуйлович //

Ферментативная и спиртовая промышленность. – 1987. - № 6. – С. 35-37.

77. Грачев, Ю. П. Математические методы планирования эксперимента: учеб. / Ю. П. Грачев, Ю. М. Плаксин. – М.: ДеЛи принт, 2005. – 296 с.

78. Блинова, Е. И. Планирование и организация эксперимента: учеб. / Е. И. Блинова. – Минск: БГТУ, 2010. – 230 с.

79. Соколов, Г. А. Введение в регрессионный анализ и планирование регрессионных экспериментов в экономике / Г. А. Соколов, Р. В. Сагитов. – М.: ИНФРА-М, 2010. – 208 с.

80. Воскобойников, Ю. Е. Математическая обработка эксперимента в молекулярной газодинамике / Ю. Е. Воскобойников, Н. Г. Преображенский, А. И. Седельников. – Москва: Огни, 2009. – 438 с.

81. Математическая теория экспериментального планирования. – М.: Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 2010. – 392 с.

82. Налимов, В. В. Логические основания планирования эксперимента / В. В. Налимов, Т. И. Голикова. – М.: Металлургия, 2013. – 128 с.

83. Бородулин, Д. М. Интенсификация процесса охмеления пивного сусла с применением роторно-пульсационного аппарата / Д. М. Бородулин, И. О. Миленький [и др.] // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: «Процессы и аппараты пищевых производств». – 2017. – № 4. – С. 3–12.

84. Миленький, И. О. Исследование процесса охмеления пивного сусла с помощью роторно-пульсационного аппарата / И. О. Миленький // II Международная научно-практическая конференция. «Актуальные проблемы пищевой промышленности и общественного питания». - Екатеринбург 2018, - С 168 – 172.

85. Миленький, И. О. Совершенствование технологии охмеления пивного сусла с помощью роторно-пульсационного аппарата / И. О. Миленький // IX Евразийский экономический форум молодежи. Конкурс «Продовольственная безопасность» - Екатеринбург, 2018. - С. 240 – 246.

86. Сафонова, Е. А. Интенсификация процесса охмеления пивного сусла с использованием роторно-пульсационного аппарата / И. О. Миленький, Е. А. Сафонова // IV Международная научная конференция «Пищевые инновации и

биотехнологии» - Кемерово, 2016. - С. 190 – 193.

87. Иванец, В. Н. Способы охмеления пивного сусла и возможности их усовершенствования / И. О. Миленский, В. Н. Иванец // X Международная научно-практическая конференция молодых учёных и специалистов отделения сельскохозяйственных наук РАН - Москва, 2016. - С. 229 – 231.

88. Бородулин, Д. М. Исследование эффективности применения Роторно-пульсационного аппарата для получения хмелевого экстракта / Д. М. Бородулин, Е. А. Сафонова, И. О. Миленский // Наука и образование: тенденции и перспективы. Международная научно-практическая конференция - Уфа, 29-30 июня 2017 г. - С. 54 – 58.

89. Миленский, И. О. Применение регрессионного анализа для оценки охмеления пивного сусла». / И. О. Миленский // VI Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. «Пищевые инновации и биотехнологии» - Кемерово, 2018. - С. 203 – 207.

90. Бородулин, Д. М. Исследование процесса охмеления пивного сусла с применением современного оборудования / Д. М. Бородулин, Е. А. Сафонова, М. В. Просин, И. О. Миленский // Современные материалы, техника и технологии. - 2017. - № 3(11). - С. 16–21.

91. Бородулин, Д. М. Создание нового способа охмеления пивного сусла с использованием роторно-пульсационного аппарата. / Д. М. Бородулин, Е. А. Сафонова, М. В. Просин, И. О. Миленский // Инновационный конвент 2016. «Кузбасс: образование, наука, инновации». Кемерово 2016. - С. 165 – 168.

92. ТУ 4215-002-45455637-99. Анализатор качества пива «Колос-1». – Введ. 27.07.2010. – Новосибирск: ФГУП «УНИИМ», свидетельство об аттестации МВИ, 2010. - 13 с.

93. Structural and parametric identification of the model for the process of obtaining hop extract at the rotary pulsation machine / M. A. Novoseltseva, S. G. Gutova, E. S. Kagan, D. M. Borodulin, E. A. Safonova, I. O. Milenkiy // 2020 Journal of food processing and preservation, Kemerovo, Russia, 2020, e14546.

94. Alternatives to conventional thermal treatments in fruit-juice processing. Part 1: techniques and applications / C. Jiménez-Sánchez [et al.] // *Critical reviews in food science and nutrition*. – 2017. – Vol. 57, № 3. – P. 501–523.

95. Alternatives to conventional thermal treatments in fruit-juice processing. Part 2: effect on composition, phytochemical content, and physicochemical, rheological, and organoleptic properties of fruit juices / C. Jiménez-Sánchez [et al.] // *Critical reviews in food science and nutrition*. – 2017. – Vol. 57, № 3. – P. 637–652.

96. Gluten reduction in beer by hydrodynamic cavitation assisted brewing of barley malts / L. Albanese [et al.] // *LWT - Food Science and Technology*. – 2017. – Vol. 82, № 1. – P. 342–353.

97. Albanese, L. Beer-brewing powered by controlled hydrodynamic cavitation: Theory and real-scale experiments / L. Albanese [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. – 2017. – Vol. 142, № 4. – P. 1457–1470.

98. Optimization of Ultrasound-Assisted Extraction of phenolic compounds and anthocyanins from blueberry (*Vaccinium ashei*) wine pomace / B. He [et al.] // *Food Chemistry*. – 2016. – Vol. 204. – P. 70–76.

99. Beer-brewing powered by controlled hydrodynamic cavitation: Theory and real-scale experiments / L. Albanese [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. – 2017. – Vol. 142, №. 4. – P. 1457–1470.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

Матрица планирования

В натуральном виде			В кодировочном виде		
Температура обработки, t, °С	Частота вращения ротора, n, мин ⁻¹	Время обработки, τ, мин	X	X1	X2
55	2000	1	-1	-1	-1
70	2000	1	0	-1	-1
85	2000	1	1	-1	-1
55	2000	2	-1	-1	0
70	2000	2	0	-1	0
85	2000	2	1	-1	0
55	2000	3	-1	-1	1
70	2000	3	0	-1	1
85	2000	3	1	-1	1
55	2500	1	-1	0	-1
70	2500	1	0	0	-1
85	2500	1	1	0	-1
55	2500	2	-1	0	0
70	2500	2	0	0	0
85	2500	2	1	0	0
55	2500	3	-1	0	1
70	2500	3	0	0	1
85	2500	3	1	0	1
55	3000	1	-1	1	-1
70	3000	1	0	1	-1
85	3000	1	1	1	-1
55	3000	2	-1	1	0
70	3000	2	0	1	0
85	3000	2	1	1	0
55	3000	3	-1	1	1
70	3000	3	0	1	1
85	3000	3	1	1	1

Приложение Б

Содержание изогумулона в экспериментальных образцах,
полученных с хмелевым экстрактом на основе пивного сусле

В натуральном виде			В кодировочном виде			Содержание изогумулона в хмелевом экстракте (s=0,1 мм), И, мг/дм ³	Содержание изогумулона в охмеленном сусле (s=0,1 мм), И, мг/дм ³	Содержание изогумулона в хмелевом экстракте (s=0,3 мм), И, мг/дм ³	Содержание изогумулона в охмеленном сусле (s=0,3 мм), И, мг/дм ³	Содержание изогумулона в хмелевом экстракте (s=0,5 мм), И, мг/дм ³	Содержание изогумулона в охмеленном сусле (s=0,5 мм), И, мг/дм ³
Температура обработки, t, °С	Частота вращения ротора, n, мин ⁻¹	Время обработки, τ, мин	x1	x2	x3						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
55	2000	1	-1	-1	-1	12,22	23,21	13,58	25,802	11,61	21,47
70	2000	1	0	-1	-1	16,21	30,79	18,02	34,238	16,119	29,82
85	2000	1	1	-1	-1	17,11	32,5	19,02	36,138	15,39	28,47
55	2000	2	-1	-1	0	13,25	25,17	14,73	27,987	13,257	24,52
70	2000	2	0	-1	0	16,57	31,48	18,42	34,998	16,57	30,65
85	2000	2	1	-1	0	18,31	34,78	20,35	38,66	17,29	31,98
55	2000	3	-1	-1	1	15,1	28,69	16,78	31,88	14,26	26,38
70	2000	3	0	-1	1	18,1	34,39	20,12	38,23	18,102	33,48
85	2000	3	1	-1	1	19,93	37,86	22,15	42,08	18,82	34,81
55	2500	1	-1	0	-1	16,93	32,16	18,82	35,75	15,99	29,58
70	2500	1	0	0	-1	18,36	34,88	20,41	38,77	17,34	32,07
85	2500	1	1	0	-1	18,98	36,06	21,09	40,07	17,92	33,15
55	2500	2	-1	0	0	18,05	34,29	20,06	38,14	17,05	31,54
70	2500	2	0	0	0	21,34	40,54	23,72	45,06	20,16	37,29
85	2500	2	1	0	0	24,08	45,75	26,76	50,84	22,74	42,06
55	2500	3	-1	0	1	20,09	36,16	22,33	42,42	18,98	35,11
70	2500	3	0	0	1	22,9	43,51	25,45	48,35	21,63	40,01
85	2500	3	1	0	1	26,3	51,02	29,23	55,53	24,84	45,95
55	3000	1	-1	1	-1	18,06	33,41	20,07	38,13	17,05	32,22
70	3000	1	0	1	-1	23,12	43,92	25,69	48,81	21,82	40,36
85	3000	1	1	1	-1	24,1	46,51	26,78	50,88	22,76	42,106

Продолжение таблицы Б 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
55	3000	2	-1	1	0	20,7	37,26	23,01	43,71	19,57	36,2
70	3000	2	0	1	0	25,12	47,72	27,92	53,04	23,73	43,9
85	3000	2	1	1	0	28,41	54,54	31,57	59,98	26,83	49,63
55	3000	3	-1	1	1	23,76	44,9	26,41	50,17	22,44	41,51
70	3000	3	0	1	1	27,62	52,47	30,69	58,31	26,08	48,24
85	3000	3	1	1	1	30,52	58,29	33,92	64,44	28,83	53,33

Приложение В

Содержание полифенолов в экспериментальных образцах,
полученных с хмелевым экстрактом на основе пивного суслу

В натуральном виде			В кодировочном виде			Содержание полифенолов в хмелевом экстракте (s=0,1 мм), И, мг/дм ³	Содержание полифенолов в охмеленном сусле (s=0,1 мм), И, мг/дм ³	Содержание полифенолов в хмелевом экстракте (s=0,3 мм), И, мг/дм ³	Содержание полифенолов в охмеленном сусле (s=0,3 мм), И, мг/дм ³	Содержание полифенолов в хмелевом экстракте (s=0,5 мм), И, мг/дм ³	Содержание полифенолов в охмеленном сусле (s=0,5 мм), И, мг/дм ³
Температура обработки, t, °С	Частота вращения ротора, n, мин ⁻¹	Время обработки, τ, мин	x1	x2	x3						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
55	2000	1	-1	-1	-1	167	165	170	169	158	157
70	2000	1	0	-1	-1	174	170	169	165	160	151
85	2000	1	1	-1	-1	171	170	165	164	168	161
55	2000	2	-1	-1	0	159	157	160	152	167	161
70	2000	2	0	-1	0	160	158	167	159	165	160
85	2000	2	1	-1	0	182	179	175	173	164	162
55	2000	3	-1	-1	1	169	165	160	153	158	157
70	2000	3	0	-1	1	194	190	174	170	167	160
85	2000	3	1	-1	1	155	151	174	170	170	164
55	2500	1	-1	0	-1	159	151	165	159	157	153
70	2500	1	0	0	-1	160	159	171	164	169	160
85	2500	1	1	0	-1	173	169	159	157	171	161
55	2500	2	-1	0	0	172	170	184	165	181	176
70	2500	2	0	0	0	157	154	176	165	180	170
85	2500	2	1	0	0	174	172	178	170	169	161
55	2500	3	-1	0	1	186	183	165	162	170	162
70	2500	3	0	0	1	176	177	169	163	165	158
85	2500	3	1	0	1	155	151	164	161	170	161
55	3000	1	-1	1	-1	160	159	170	164	167	160
70	3000	1	0	1	-1	178	175	168	166	156	155
85	3000	1	1	1	-1	176	174	173	170	164	154
55	3000	2	-1	1	0	169	165	172	170	169	167

Продолжение таблицы В 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
70	3000	2	0	1	0	159	159	168	165	172	170
85	3000	2	1	1	0	161	160	170	160	179	174
55	3000	3	-1	1	1	179	176	158	152	167	160
70	3000	3	0	1	1	167	161	179	170	178	172
85	3000	3	1	1	1	171	167	173	171	170	160

Приложение Г

Содержание высокомолекулярной фракции белка А в экспериментальных образцах, полученных с использованием хмелевого экстракта на основе пивного сусле

В натуральном виде			В кодировочном виде			Высокомолекулярная фракция белка А в хмелевом экстракте (s=0,1 мм), А, мг/100см ³	Высокомолекулярная фракция белка А в охмеленном сусле (s=0,1 мм), А, мг/100см ³	Высокомолекулярная фракция белка А в хмелевом экстракте (s=0,3 мм), А, мг/100см ³	Высокомолекулярная фракция белка А в охмеленном сусле (s=0,3 мм), А, мг/100см ³	Высокомолекулярная фракция белка А в хмелевом экстракте (s=0,5 мм), А, мг/100см ³	Высокомолекулярная фракция белка А в охмеленном сусле (s=0,5 мм), А, мг/100см ³
Температура обработки, t, °С	Частота вращения ротора, n, мин ⁻¹	Время обработки, τ, мин	x1	x2	x3						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
55	2000	1	-1	-1	-1	14	13,6	13,4	13,1	13,8	13,4
70	2000	1	0	-1	-1	14	13,6	13,3	13	13,6	13,2
85	2000	1	1	-1	-1	13,8	13,4	13,5	13	13,6	13,3
55	2000	2	-1	-1	0	13,5	13,2	13,6	13,2	13,5	13,1
70	2000	2	0	-1	0	13,9	13,5	13,4	13,1	13,7	13,2
85	2000	2	1	-1	0	14	13,5	13,5	13,2	13,8	13,2
55	2000	3	-1	-1	1	13,8	13,4	13,2	12,9	13,9	13,2
70	2000	3	0	-1	1	13,6	13,3	13,7	13,3	13,5	13,3
85	2000	3	1	-1	1	13,6	13,3	13,5	13,1	13,4	13,1
55	2500	1	-1	0	-1	13,4	13,1	13,6	13,2	13,3	13
70	2500	1	0	0	-1	13,6	13,2	13,5	13,2	13,5	13,1
85	2500	1	1	0	-1	13,5	13,2	13,4	13	13,6	13,1
55	2500	2	-1	0	0	13,4	13,2	13,1	12,8	13,3	13
70	2500	2	0	0	0	13,4	13,2	13,2	12,9	13,2	12,8
85	2500	2	1	0	0	13,5	13,1	13,6	13,1	13,4	13,1
55	2500	3	-1	0	1	13,6	13,2	12,9	12,7	13,3	13
70	2500	3	0	0	1	13,5	13,2	13	12,7	13,5	13,1
85	2500	3	1	0	1	13,4	13,1	13,9	13,3	13,1	12,7
55	3000	1	-1	1	-1	13,7	13,2	13,4	13	13,2	12,8
70	3000	1	0	1	-1	13,8	13,3	13,6	13,1	13,7	13,1
85	3000	1	1	1	-1	13,5	13	13,1	13	13,4	13

Продолжение таблицы Г 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
55	3000	2	-1	1	0	13,6	13,2	13,2	13	13,2	12,8
70	3000	2	0	1	0	13,5	13,1	13,3	13	13,4	13
85	3000	2	1	1	0	13,7	13,2	13,3	13	13,5	13,1
55	3000	3	-1	1	1	13,6	13,2	13,2	12,8	13,4	13,1
70	3000	3	0	1	1	13,8	13,3	13,4	13	13,3	12,9
85	3000	3	1	1	1	13,5	13	13,4	13,1	13,1	12,7

Приложение Д

Содержание изогумулона в экспериментальных образцах, полученных с использованием хмелевого экстракта на основе первых промывных вод

В натуральном виде			В кодировочном виде			Содержание изогумулона в хмелевом экстракте, (s=0,1 мм), И ₁ , мг/дм ³	Содержание изогумулона в охмеленном сусле (s=0,1 мм), И ₁ , мг/дм ³	Содержание изогумулона в хмелевом экстракте, (s=0,3 мм), И ₁ , мг/дм ³	Содержание изогумулона в охмеленном сусле (s=0,3 мм), И ₁ , мг/дм ³
Температура обработки, t, °С	Частота вращения ротора, n, мин ⁻¹	Время обработки, τ, мин	x1	x2	x3				
55	2500	1	-1	0	-1	9,48	14,39	11,36	23,85
70	2500	1	0	0	-1	10,01	16,52	13,84	28,38
85	2500	1	1	0	-1	10,43	16,13	14,82	28,15
55	2500	2	-1	0	0	10,46	16,45	12,32	27,11
70	2500	2	0	0	0	11,98	18,13	14,15	29,01
85	2500	2	1	0	0	12,42	21,67	15,19	28,86
55	2500	3	-1	0	1	12,34	18,08	12,09	25,39
70	2500	3	0	0	1	12,98	19,46	14,47	28,67
85	2500	3	1	0	1	13,45	26,38	15,32	29,11
55	3000	1	-1	1	-1	12,57	18,97	12,19	25,59
70	3000	1	0	1	-1	12,97	23,86	14,32	29,35
85	3000	1	1	1	-1	13,29	25,18	15,46	29,37
55	3000	2	-1	1	0	12,89	21,11	13,64	27,28
70	3000	2	0	1	0	13,67	26,62	15,11	31,97
85	3000	2	1	1	0	13,98	29,48	15,84	30,09
55	3000	3	-1	1	1	13,87	24,66	14,77	31,01
70	3000	3	0	1	1	14,69	29,12	15,18	32,11
85	3000	3	1	1	1	15,01	32,12	17,29	32,85

Приложение Е

Содержание изогумулона в экспериментальных образцах, полученных с использованием хмелевого экстракта на основе последних промывных вод

В натуральном виде			В кодировочном виде			Содержание изогумулона в хмелевом экстракте, (s=0,1 мм), И _п , мг/дм ³	Содержание изогумулона в охмеленном сусле (s=0,1 мм), И _п мг/дм ³	Содержание изогумулона в хмелевом экстракте, (s=0,3 мм), И _п , мг/дм ³	Содержание изогумулона в охмеленном сусле (s=0,3 мм), И _п , мг/дм ³
Температура обработки, t, °С	Частота вращения ротора, n, мин ⁻¹	Время обработки, τ, мин	x1	x2	x3				
55	2500	1	-1	0	-1	16,35	31,15	22,48	47,2
70	2500	1	0	0	-1	16,79	34,06	27,69	56,76
85	2500	1	1	0	-1	17,65	36,36	29,63	56,3
55	2500	2	-1	0	0	17,05	32,89	24,87	54,22
70	2500	2	0	0	0	18,67	39,50	28,30	58,02
85	2500	2	1	0	0	20,19	43,55	30,38	57,72
55	2500	3	-1	0	1	18,98	35,18	25,61	50,78
70	2500	3	0	0	1	20,97	43,31	27,97	57,34
85	2500	3	1	0	1	23,46	49,08	30,64	58,22
55	3000	1	-1	1	-1	17,75	34,45	24,37	51,18
70	3000	1	0	1	-1	21,22	44,78	28,63	58,7
85	3000	1	1	1	-1	23,13	48,52	30,92	58,74
55	3000	2	-1	1	0	19,25	39,46	25,98	54,56
70	3000	2	0	1	0	23,16	48,23	31,19	63,94
85	3000	2	1	1	0	25,71	56,29	31,65	60,14
55	3000	3	-1	1	1	23,74	45,19	29,60	62,17
70	3000	3	0	1	1	25,89	54,76	30,84	64,23
85	3000	3	1	1	1	27,91	57,47	33,53	63,7

Приложение Ж

Дегустационный акт

Лабораторией ООО «Бавария» была проанализирована и продегустирована проба пива «Жигулевское», произведенного по классической технологии - образец 1 и проба экспериментального пива «Жигулёвское» с хмелевым экстрактом, приготовленным в роторно-пульсационном аппарате - образец 2.

- | | |
|--|--------|
| 1. экстрактивность начального сула, % | - 11,1 |
| 2. объемная доля спирта, % | - 4,3 |
| 3. величина действительного экстракта, % | - 4,02 |
| 4. кислотность, К. ед | - 1,9 |
| 5. цветность, Ц. ед | - 0,8 |

Для оценки качества пива, на заводе была организована дегустационная комиссия.

Состав дегустационной комиссии:

Эксперт 1: директор ООО «Бавария» Ю.А. Попов

Эксперт 2: главный технолог ООО «Бавария» И.Г. Жихарева

Эксперт 3: зав. лабораторией ООО «Бавария» Т. М. Рассохина

Оценка качества проводилась по следующим показателям: прозрачность, цвет, вкус, хмелевая горечь, хмелевой аромат, пена и насыщенность.

Показатели качества	Балловая оценка					
	Эксперт 1		Эксперт 2		Эксперт 3	
	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 1	Образец № 2
Прозрачность	3	2	3	2	3	3
Цвет	3	3	3	3	3	3
Аромат	4	3	3	4	4	4
Вкус	3	3	4	2	4	3
Хмелевая горечь	4	4	4	4	4	4
Пена и насыщенность	3	3	4	3	4	4

Средняя сумма баллов для пива «Жигулевское» - 21. Общая оценка: хорошо.

Средняя сумма баллов для пива «Жигулевское» приготовленного с помощью хмелевого экстракта на РПА - 19. Общая оценка: хорошо.



Ю. А. Попов

И. Г. Жихарева

Т. М. Рассохина

Приложение 3

Акт испытаний РПА в технологической линии по производству
пива в ООО «Бавария»

Настоящим актом удостоверяется, что на ООО «Бавария» изучены теоретические разработки и практические рекомендации исследования Миленького И.О. Предложено решение проблемы, связанного с качеством пива в виде усовершенствованного технологического способа охмеления пивного сусла, что является применимым в условиях производства. В связи с этим, следует отметить актуальность диссертационной работы и её востребованность в современных производственных условиях.

Работа по повышению эффективности оборудования, в частности роторно-пульсационного аппарата (РПА) и разработка рекомендаций по его применению составляют один из важных этапов внедрения технологического оборудования в производственный процесс. Предложенный способ интенсификации процесса охмеления пивного сусла не требует каких-либо серьезных изменений в технологическом цикле. Потребление энергии и жидкости для работы РПА незначительно, что сокращает затраты на эксплуатацию аппарата.

Предложена основа технологии производства пива из хмелевого экстракта с учётом особенностей процесса охмеления в РПА. Применение хмелевого экстракта позволит сократить длительность стадии охмеления сусла с хмелем, являющуюся наиболее энергоёмкой и требующей дорогостоящего оборудования. Это особенно важно при расширении производства и проектировании малых пивоварен, находящихся на расстоянии от основного предприятия. Хмелевой экстракт так же может быть использован в качестве регулировки норм внесения хмеля в пивное сусло.

После подробного изучения содержания диссертации, результатов и выводов, полученных автором, считаем, что работа Миленького И.О. является законченным и научно обоснованным исследованием.

На основе рассмотренных материалов исследования, было принято решение о перспективах внедрения технологии охмеления пивного сусла с

применением роторно-пульсационного аппарата в производство ООО «Бавария».

Отзыв рассмотрен на производственном заседании (протокол № 17 от 22.12.2017 г.).

Состав производственного заседания:

- директор ООО „Бавария”	Ю. А. Попов
- главный технолог ООО „Бавария”	И. Г. Жихарева
- зав. лабораторией ООО „Бавария”	Т. М. Рассохина



Ю. А. Попов

И. Г. Жихарева

Т. М. Рассохина

Приложение И

Балльная шкала для проведения органолептической оценки качества пива

Показатель качества	Органолептическая характеристика пива	Балльная оценка
1	2	3
Прозрачность	Прозрачное с блеском, без взвесей	3 (отл.)
	Прозрачное без блеска, единичные мелкие взвеси (пылевидные)	2 (хор.)
	Слабо опалесцирующее	1 (удов.)
	Сильно опалесцирующее, мутное	0 (неуд.)
Цвет	Соответствует типу пива, находится на минимально установленном уровне для данного типа пива	3 (отл.)
	Соответствует типу пива, находится на среднем уровне	2 (хор.)
	Соответствует типу пива, максимально допустимый для данного типа пива	1 (удов.)
	Не соответствует типу пива, светлее или темнее установленного стандартом уровня	0 (неуд.)
Аромат	Отличный аромат, соответствующий данному типу пива, чистый, свежий, выраженный.	4 (отл.)
	Хороший аромат, соответствующий типу пива, но не достаточно выраженный.	3 (хор.)
	В аромате заметны посторонние оттенки, слегка сырого, фруктового, очень выражен солодовый тон.	2 (удов.)
	Выражены посторонние тона в аромате: фруктовый, кислый, аромат молодого пива и т.д.	1 (неуд.)
Вкус	Отличный, полный, чистый, без посторонних привкусов, гармоничный вкус, соответствующий данному типу пива.	5 (отл.)
	Хороший чистый вкус, соответствующий данному типу пива, но не очень гармоничный.	4 (хор.)
	Не очень чистый вкус, незрелый, привкус молодого пива, карамельный, вкус пустоватый, слабо выраженный.	3 (удов.)
	Пустой вкус и посторонние привкусы: дрожжевой, фруктовый, острый, кислый.	2 (неуд.)
Хмелевая горечь	Чисто хмелевая, мягкая, слаженная, соответствующая типу пива.	5 (отл.)
	Чисто хмелевая, не очень слаженная, слегка отстающая, грубоватая.	4 (хор.)
	Хмелева грубая, отстающая или слабая, не соответствующая типу пива.	3 (удов.)
	Не хмелевая, грубая.	2 (неуд.)
Пена и насыщенность диоксидом углерода	Обильная, компактная, устойчивая, хорошо прилипающая пена высотой не менее 40 мм, стойкостью не менее 4 мин при обильном и медленном выделении пузырьков газа.	5 (отл.)
	Компактная, устойчивая пена высотой не менее 30 мм и стойкостью не менее 3 мин при редком и быстро исчезающем выделении пузырьков газа.	4 (хор.)
	Пена высотой не менее 20 мм, стойкостью не менее 2 мин.	3 (удов.)
	Пена высотой менее 20 мм, стойкостью менее 2 мин.	2 (неуд.)

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2634870

Способ охмеления пивного сула

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Кемеровский технологический институт пищевой промышленности (университет)" (RU)*


Авторы: *Бородулин Дмитрий Михайлович (RU), Сафонова Елена Александровна (RU), Иванец Виталий Николаевич (RU), Лапина Татьяна Павловна (RU), Миленький Илья Олегович (RU)*

Заявка № 2016129114

Приоритет изобретения 15 июля 2016 г.

Дата государственной регистрации в
Государственном реестре изобретений
Российской Федерации 07 ноября 2017 г.Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 15 июля 2036 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев

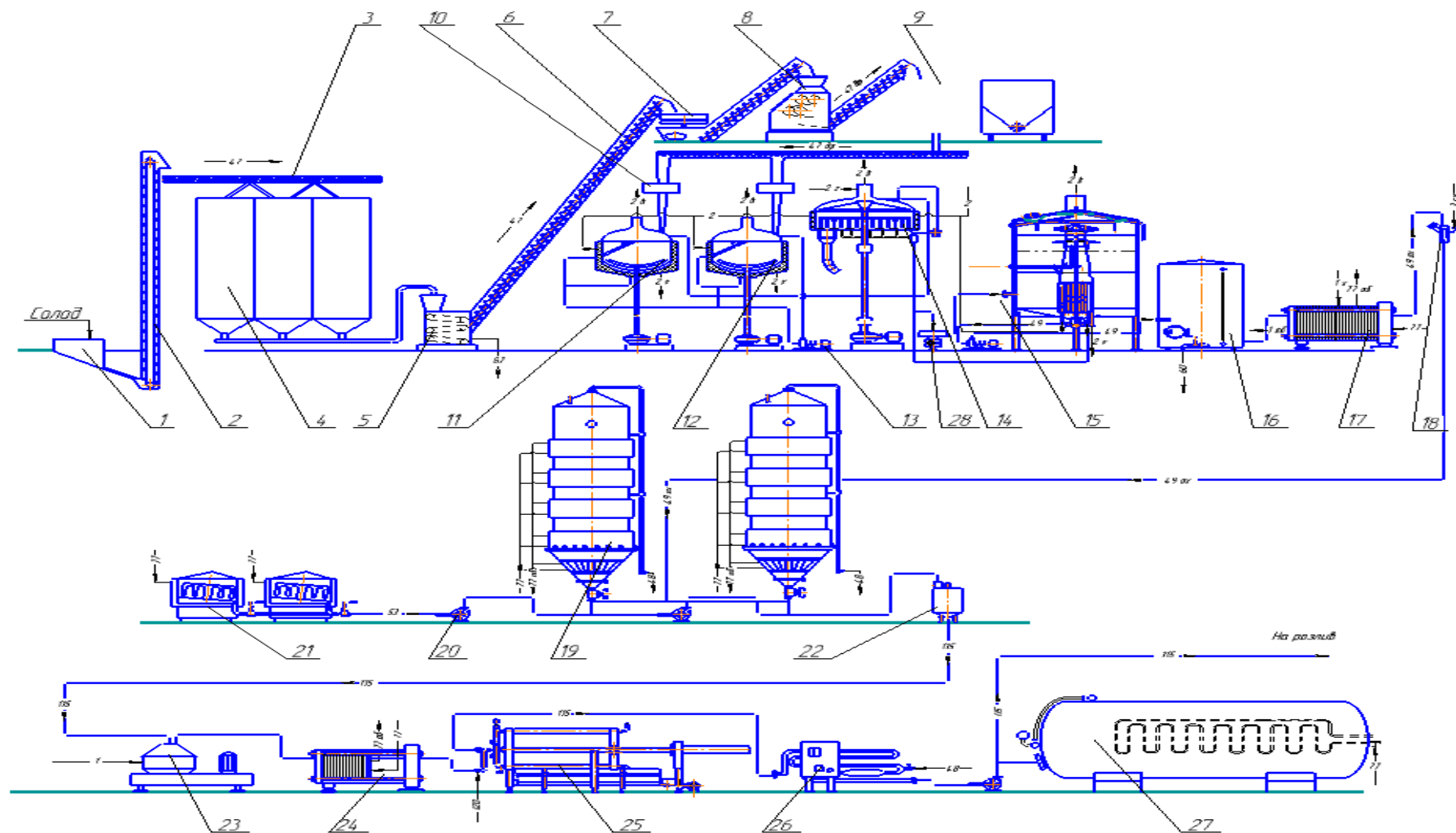


Рисунок Л- Машинно-аппаратурная схема производства пива

1 приемный бункер; 2 – нория; 3 - конвейер винтовой; 4 – силоса; 5- машина полировочная; 6 – нория; 7 - магнитный сепаратор; 8 –дробилка; 9 – бункер; 10 - весы ;11 - котел заторный 1; 12 - котел заторный 2; 13 – насос; 14 - чан фильтрационный; 15 - котел сусловарочный; 16 - чан гидроциклонный; 17 - пластинчатый теплообменник; 18 – аэратор; 19 - цилиндрикоконический танк; 20 – насос; 21 - аппарат дрожжерастительной; 22 – смеситель; 23 – сепаратор; 24 - охладитель пива; 25 - пластинчатый фильтр-пресс; 26 – карбонизатор; 27-форфас; 28 - роторно-пульсационный аппарат