

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Кемерово 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кемеровский государственный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Бородулин Дмитрий Михайлович

**Официальные
оппоненты:**

Федоренко Борис Николаевич
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Московский государственный
университет пищевых производств», кафедра
«Прикладная механика и инжиниринг
технических систем», заведующий кафедрой

Каменская Елена Петровна
кандидат биологических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Алтайский государственный
технический университет им. И.И. Ползунова»,
г. Барнаул, кафедра «Технология бродильных
производств и виноделие», и.о. заведующего
кафедрой

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Воронежский государственный
университет инженерных технологий»

Защита состоится 27 ноября 2021 г. в 12.30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.088.11 при ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет» по адресу: 650056, г. Кемерово, б-р Строителей, 47, 2 лекц. ауд.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет» (<https://kemsu.ru/science/dissertation-councils/diss-212-088-11/protects/11918/>)

Отзывы на автореферат отправлять по адресу: 650000, г. Кемерово, ул. Красная, 6.

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Попова Дина Геннадьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 сусла. Эта стадия отвечает за формирование большинства органолептических характеристик будущего пива. Однако, применяемые в пивоваренном производстве способы охмеления сусла 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 сусла 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 сусла, 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.

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.

Цель и задачи исследования. Совершенствование процесса охмеления пивного сусла с применением роторно-пульсационного аппарата.

Поставленная цель достигается благодаря решению следующих задач:

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.

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 значимость. 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. 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 сусларочных 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 сусла и промывных вод, с применением структурно-параметрической идентификации; новый способ охмеления пивного сусла.

Степень достоверности и апробация результатов работы. 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.

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

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 14 работ. Из них: 2 в журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, 2 патента РФ; 1 в издании, проиндексированном в базах научного цитирования Scopus и Web of Science.

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи работы, представлена общая характеристика работы.

В первой главе представлены и проанализированы технологические особенности производства пива. Факторы, оказывающие влияние на процесс охмеления пивного сусла, а также конструкции сусловарочных аппаратов и смежного оборудования, которое позволит интенсифицировать процесс охмеления пивного сусла. Обзор известного оборудования для охмеления пивного сусла показал, что применение РПА – это один из перспективных способов интенсификации процесса охмеления. Поэтому исследования в данной области являются актуальными.

Во второй главе представлено описание опытно-исследовательского стенда, который состоит из роторно-пульсационного аппарата и блока приборов, для управления и контроля режимов работы. Описаны характеристики материалов, применяемых в экспериментальных исследованиях. Определены методы экспериментальных исследований проведения качественных показателей пивного сусла. На рисунке 1 представлена схема РПА. Его применение на стадии приготовления хмелевого экстракта дает следующие эффекты:

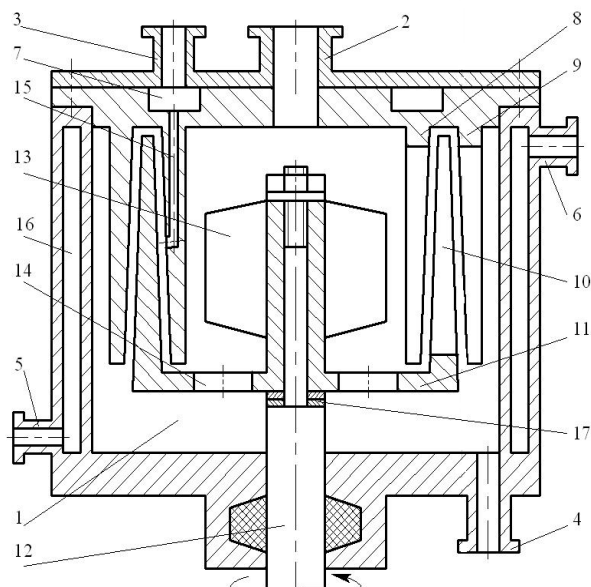


Рисунок 1 – Роторно-пульсационный аппарат (Патент РФ № 2634870)

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

1. Перекрытие пазов ротора и статора приводит к созданию кавитационных зон и образованию ударных волн. Эти явления увеличивают скорость измельчения частиц хмеля.

2. Благодаря активной турбулентности и пульсациям давления, создающимися внутри аппарата, увеличивается растворимость хмеля, что приводит к качественному взаимодействию пивного сусла с гранулированным хмелем.

3. Активное движение частиц сусла с хмелем в местах трения повышает температуру хмелевого экстракта, и, следовательно, увеличивает коэффициент внутренней диффузии. Из этого следует, что ускорение процессов экстрагирования и диспергирования возникает за счет того, что создаются рециркуляционные потоки, увеличивающие взаимопроникновение применяемых компонентов и лучшее их равномерное распределение.

Для исследования процесса приготовления хмелевого экстракта, состоящего из гранулированного хмеля и экстрагента на основе пивного сусла или промывных вод поставлен полнофакторный эксперимент (ПФЭ). Значения интервалов варьирования приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Интервалы варьирования

Уровень	Температура обрабатываемой среды t , °C	Частота 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

В исследуемых образцах измерялось содержание изогумулонов, полифенолов и высокомолекулярная фракция белка А (влияние на коллоидную стойкость пива).

В третьей главе приводятся результаты и анализ экспериментальных данных по исследованию влияния оптимальных параметров работы РПА на процесс охмеления пивного сусла. На основе варьируемых параметров представленных в таблице 1 были проведены исследования по определению горьких веществ хмеля (изогумулонов) в экстрактах на основе различных экстрагентов. Полученные результаты представлены в виде графиков зависимости содержания изогумулонов в хмелевом экстракте и пивном сусле от продолжительности приготовления и частоты вращения ротора в РПА при различных температурах экстрагента.

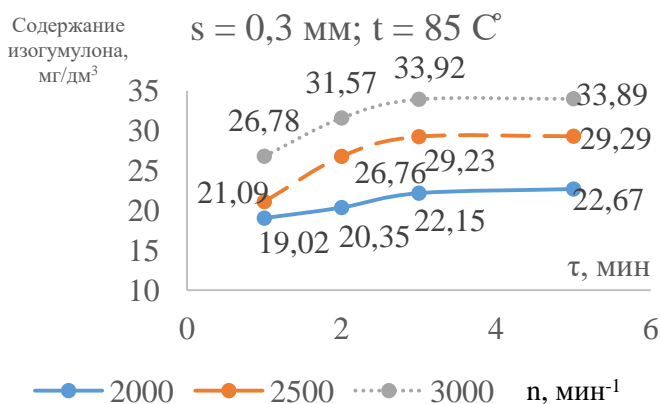


Рисунок 2 - График зависимости содержания изогумулона в хмелевом экстракте от времени приготовления и частоты вращения ротора в РПА при $t = 85$ °C и $s = 0,3$ мм

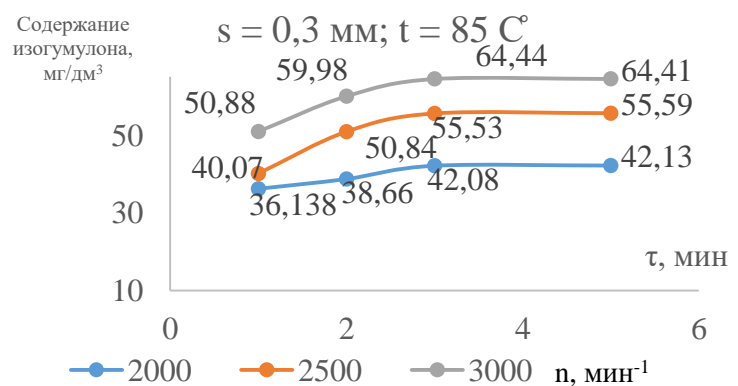


Рисунок 3 - График зависимости содержания изогумулона в охмеленном пивном сусле хмелевым экстрактом, полученном в РПА при $t = 85$ °C и $s = 0,3$ мм

На рисунках 2 и 3 представлены зависимости содержания изогумулонов в хмелевом экстракте и в охмеленном пивном сусле от частоты вращения ротора и от продолжительности обработки экстракта в РПА.

Из рисунков 2 и 3 видно, что максимальный выход изогумулонов наблюдается у хмелевого экстракта на основе пивного суслу с двух и трехминутной обработкой в РПА при зазоре между ротором и статором 0,3 мм, частоте вращения ротора 3000 мин⁻¹ и температуре обрабатываемой среды 85 °С. При этих параметрах содержание изогумулонов составило 31,57 и 33,92 мг/дм³, соответственно. В пивном сусле содержание изогумулонов с двух и трехминутной обработкой в РПА составило 59,98 и 64,44 мг/дм³. Параллельно с данными исследованиями получили охмеленное пивное суслу классическим способом в котором содержание изогумулонов составило 31,13 мг/дм³. Из этого следует, что пивное суслу, полученное после обработки в РПА содержит в 2,07 раза больше горьких веществ хмеля по отношению к пивному суслу, приготовленному классическим способом.

Также, можно сделать вывод, что повышение температуры обрабатываемой среды влияет на выход изогумулонов, так как их образование осуществляется благодаря изомеризации гумулонов при кипячении хмеля. Увеличение частоты вращения ротора до 3000 мин⁻¹ позволяет получить лучшие показатели по выходу изогумулонов из хмеля, так как при этом на обрабатываемую среду происходит наложение низкочастотных упругих колебаний и кавитационной энергии. Лучшие показатели получены при зазоре между ротором и статором 0,3 мм. При зазоре 0,1 мм наблюдается интенсивное разрушение частиц гранулированного хмеля, которое способствует снижению выхода горьких веществ из хмеля, а при зазоре 0,5 мм экстракция компонентов хмеля в пивное суслу снижается за счет меньших пульсаций давления. Содержание полифенолов и высокомолекулярной фракции белка А во всех экспериментальных образцах находилось в допустимых значениях.

В результате проведенных исследований с экстрагентом на основе пивного суслу определены рациональные технические параметры РПА ($s=0,3$ мм, $n=2500$, 3000 мин⁻¹).

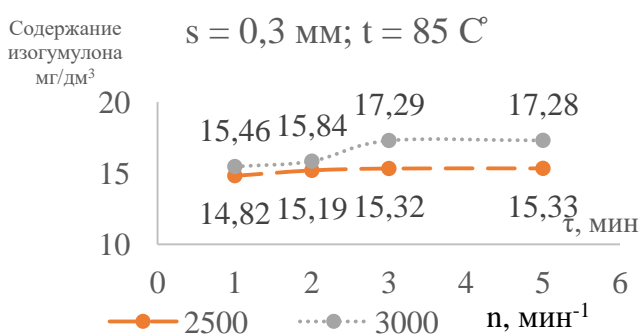


Рисунок 4 - График зависимости содержания изогумулона в хмелевом экстракте на первых промывных водах от времени приготовления и частоты вращения ротора в РПА при $t = 85$ °С и $s = 0,3$ мм

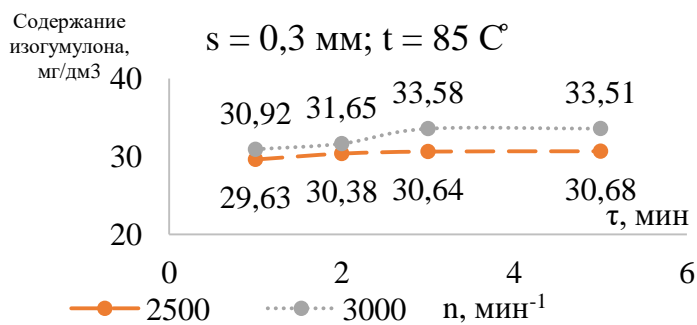


Рисунок 5 - График зависимости содержания изогумулона в охмеленном сусле на основе первых промывных вод от длительности обработки и частоты вращения ротора в РПА при $t = 85$ °С и $s = 0,3$ мм

Затем проводились исследования процесса охмеления пивного сусла на экстракте, полученном на основе промывных вод: На рисунках 4, 5 представлены графики зависимости содержания изогуμουлона в хмелевом экстракте и пивном сусле на основе первых промывных вод при температуре обрабатываемой среды 85 °С.

Из рисунков 4, 5 видно, что при зазоре между ротором и статором 0,3 мм максимальный выход изогуμουлонов отмечен у хмелевого экстракта и пивного сусла на основе первых промывных водах при трехминутной обработке в РПА и составляет 17,29 и 32,85 мг/дм³ соответственно.

Содержание изогуμουлонов в хмелевом экстракте и пивном сусле на основе последних промывных вод представлено на рисунках 6, 7. Максимальный выход изогуμουлонов наблюдается в образцах, при трехминутной обработке в РПА и составляет 33, 53 и 63,7 мг/дм³, соответственно.

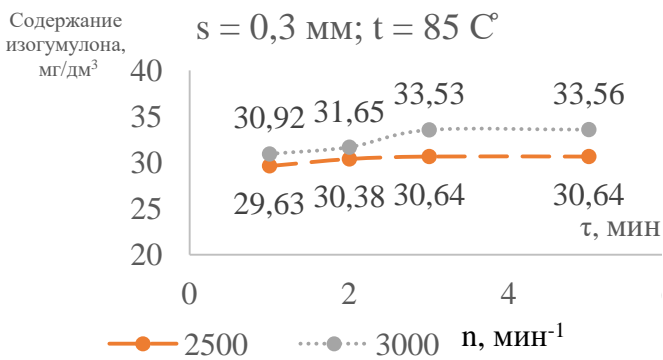


Рисунок 6 - График зависимости содержания изогуμουлона в хмелевом экстракте на основе последних промывных вод от длительности обработки и частоты вращения ротора в РПА при $t = 85 \text{ }^\circ\text{C}$ и $s = 0,3 \text{ мм}$

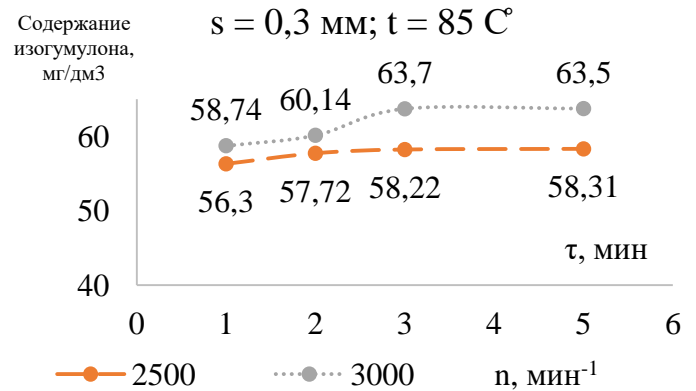


Рисунок 7 - График зависимости содержания изогуμουлона в охмеленном сусле на основе последних промывных водах от времени приготовления и частоты вращения ротора в РПА при $t = 85 \text{ }^\circ\text{C}$ и $s = 0,3 \text{ мм}$

Для охмеления пивного сусла выбран хмелевой экстракт на основе пивного сусла, так как в нем максимально значение изогуμουлонов и постоянно содержание сухих веществ, что упрощает контроль норм внесения хмеля.

В результате статистической оценки, проведенной с помощью регрессионного анализа получено уравнение, описывающее зависимость содержания изогуμουлонов, I в хмелевом экстракте от температуры, t в диапазоне 55-85 °С с зазором между ротором и статором, $s = 0,3 \text{ мм}$, частотой вращения ротора, $n = 2000 - 3000 \text{ мин}^{-1}$ и временем обработки, $\tau - 1-3 \text{ минуты}$:

$$I(\tau, t, n) = -13,883 + 0,743 \cdot \tau + 0,0695 \cdot t + 0,00983 \cdot n + 0,00179 \cdot \tau \cdot n + 0,0000568 \cdot t \cdot n - 0,682 \cdot \tau^2 - 0,00000167 \cdot n^2 \quad (1)$$

Анализируя уравнение можно сделать вывод, что наибольшее влияние на выход изогумулонов, I из рассматриваемых параметров оказывает продолжительность технологического процесса. Максимальное значение выхода изогумулонов достигается при трехминутной обработке экстракта в РПА, дальнейшее увеличение данного параметра не приводит к возрастанию горьких веществ хмеля.

В четвертой главе рассмотрена математическая модель, позволяющая смоделировать процесс получения хмелевого экстракта в РПА, с применением структурно-параметрической идентификации.

Применение структурно-параметрической идентификации на базе нетрадиционного алгоритмического аппарата непрерывных дробей дает возможность создать динамическую модель процесса для получения хмелевого экстракта с минимальным количеством экспериментальных данных или их отсутствием.

При помощи непрерывной передаточной функции (НПФ) происходит описание линейно-динамической системы:

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

где s – переменная преобразования Лапласа. Модальное представление НПФ системы можно представить в виде:

$$G(s) = K \prod_{i=1}^m (s - s_i^0) / \prod_{i=1}^n (s - s_i), \quad (3)$$

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.

Следовательно, структурно-параметрическая идентификация динамического объекта позволяет построить модели типа 2, 3, зная измерения входных и выходных воздействий при шаге дискретизации Δ .

Модель динамического объекта принимает вид:

$$G(s) = k \frac{1}{s + \frac{1}{T}} = \frac{kT}{Ts + 1}, \quad (4)$$

где T – постоянная времени, k – коэффициент усиления.

На рисунке 8 представлен график значений разгонной характеристики $h(t)$ и ее дискретной модели $h(n)$ для $\Delta = 1$, $k = 2$, $T = 1$.

Данная дискретная модель с максимальной точностью оценивает значения истинной разгонной характеристики объекта, и поэтому будет применима к определению описания состояния процесса на выходе в динамике.

Опираясь на данные входного и выходного параметров воздействия апериодического звена 1-го порядка найдена структура модели объекта и ее значения.

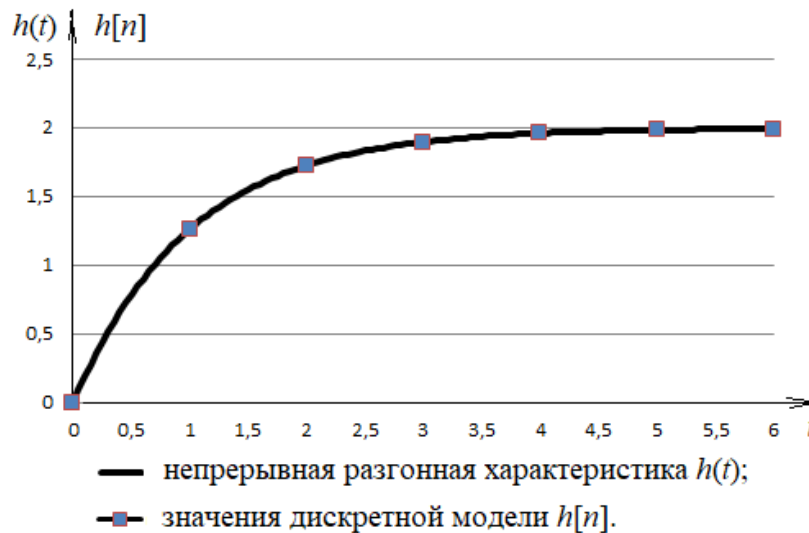


Рисунок 8 - Разгонная характеристика $h(t)$ и значения ее дискретной модели $h(n)$

Итоговая НПФ примет вид:

$$G(s) = \frac{1,797889}{0,742391 s + 1} \quad (5)$$

На основе выражения 5 получим конечно-разностное уравнение:

$$y[n] = -0,158946 \cdot y[n-1] + 0,108939 \cdot y[n-2] + 1,45125 \cdot x[n-1] + 0,436546 \cdot x[n-2]. \quad (6)$$

Аналогично получаются дискретные модели для $t = 70^\circ$ (7) и $t = 85^\circ$ (8). Число оборотов ротора остается равным $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$:

$$y[n] = -0,003202 \cdot y[n-1] + 0,095133 \cdot y[n-2] + 2,014875 \cdot x[n-1] + 0,062825 \cdot x[n-2], \quad (7)$$

$$y[n] = -0,122653 \cdot y[n-1] + 0,114558 \cdot y[n-2] + 1,923750 \cdot x[n-1] + 0,473454 \cdot x[n-2]. \quad (8)$$

На рисунке 9 приведен сравнительный анализ графиков экспериментальной зависимости и построенных конечно-разностных уравнений (6 - 8).

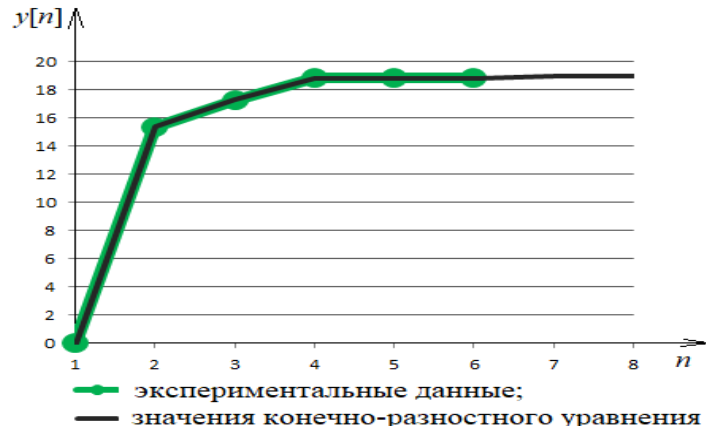


Рисунок 9 – Линейная аппроксимация исходных данных и полученной дискретной модели разгонной характеристики при $t = 85^\circ$ $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$

По рисунку видно, что построенные модели (6-8) позволяют точно оценить выходные значения процесса в течение всего времени.

После сравнения результатов идентификации процесса охмеления пивного сула с результатами аутентификации апериодического звена 1-го порядка сделано предположение, что процесс экстракции обладает сложной структурой, а также не линеен. Для более точного определения параметров K и T произведем расчеты по следующим формулам:

$$\begin{aligned}
 K &= 5,03125 - 0,30150t + 1,23941n - 0,01391tn + 0,00520t^2 + \\
 &+ 0,24156n^2 + 0,00037t^2n - 0,00632tn^2 - 0,00003t^3 - 0,00066n^3, \\
 T &= 3,71967 - 0,18400t + 0,93768n - 0,02979tn + 0,00331t^2 + \\
 &+ 0,18912n^2 + 0,00023t^2n - 0,00267tn^2 - 0,00002t^3 + 0,00005n^3.
 \end{aligned} \tag{9}$$

На рисунках 10 и 11 приведены поверхности, определяющие более точные модельные зависимости параметров K и T , найденные по формулам (8).

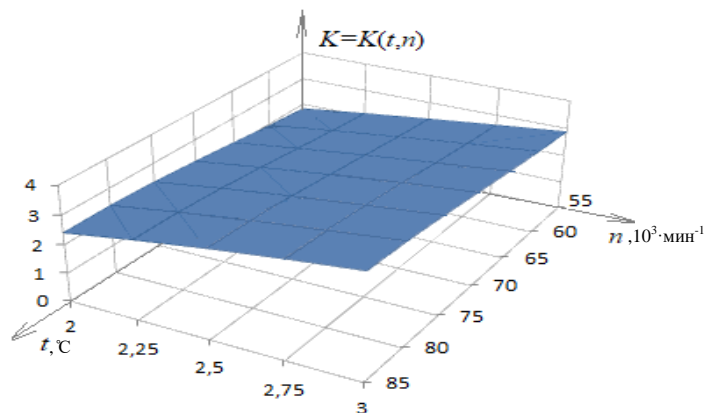


Рисунок 10 – График модельной зависимости параметра K от температуры t и частоты вращения n

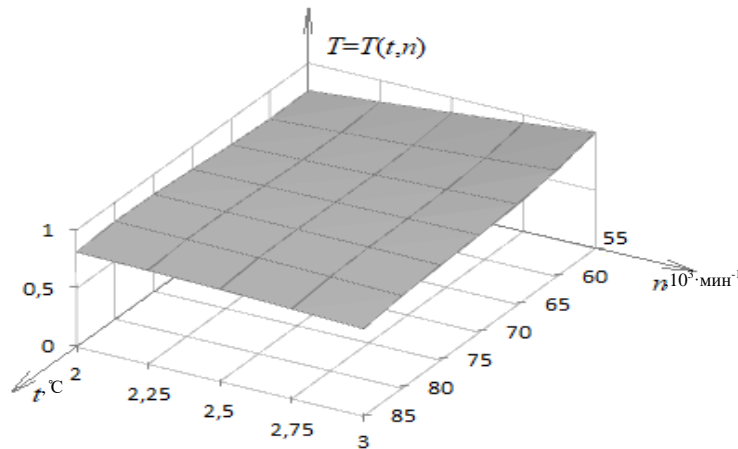


Рисунок 11 – График модельной зависимости параметра T от температуры t и частоты вращения n

Аналогично (9) определим параметры множественной регрессии третьего порядка для $K(t, n)$ и $T(t, n)$ при величине 0,3 мм значения $K(t, n)$ и $T(t, n)$ находятся по формулам:

$$K = -0,64714 + 0,01183t + 0,11421n + 0,02910tn - 0,00029t^2 + 0,09297n^2 - 0,00006t^2n - 0,00286tn^2, \quad (10)$$

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

НПФ модели процесса охмеления пивного сула на выходе из аппарата для значений параметров t, n в пределах ($55 \leq t \leq 85, 2000 \leq n \leq 3000$) опишется уравнением:

$$G(s) = \frac{K(t, n)}{T(t, n) s + 1}, \quad (11)$$

Разгонную характеристику определим по следующей формуле:

$$h(t) = K(t, n) \cdot (1 - e^{-t/T(t, n)}), \quad (12)$$

где $K(t, n)$ и $T(t, n)$ определяются на основе формулы (9) с величиной зазора между ротором и статором, 0,3 мм.

Данные, полученные из экспериментальных исследований удовлетворительно аппроксимируются разгонной характеристикой апериодического звена первого порядка. Ближайшие совпадения у полученных данных встречаются в установившемся режиме. Непрерывная передаточная функция этого звена зависит от частоты вращения ротора, температуры среды и

обладает переменными коэффициентами. Ошибки моделирования составляют 0,6 – 6 %, что допустимо для инженерных расчетов. 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.

В пятой главе описан новый способ охмеления пивного сусла на который получен Патент РФ на изобретение № 2634870. Данный способ заключается во внесении предварительно приготовленного хмелевого экстракта на основе пивного сусла в РПА в пивное сусло во время процесса кипячения. Он позволяет 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. За счет лучшей экстракции полифенолов усиливается эффект комплексообразования и осаждения белков в пивном сусле, что приводит к его лучшему осветлению и повышению коллоидной стойкости готового пива.

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 суслу (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.

Основные работы, опубликованные по материалам диссертации
Публикация в журнале, индексируемом в международной базе научного цитирования Scopus и Web of Science

1) 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.

Статьи в журналах, входящих в перечень ВАК Минобрнауки РФ

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

3) Бородулин, Д.М. Совершенствование способа приготовления пивного суслу / Д.М. Бородулин, Е.А. Сафонова, **И.О. Миленский** // Пиво и напитки. – 2018. – №4. – С. 42 – 45.

Статьи в сборниках научных трудов, журналах, материалы конференций

4) Малышева, Н.Г. Использование биологически активных веществ в производстве солода / Н.Г. Малышева, **И.О. Миленский**, Т.П Лапина // III Балтийский морской форум «Инновации в технологии продуктов здорового питания». Калининград. – 2015. – С 207 – 213.

5) Сафонова, Е.А. Интенсификация процесса охмеления пивного суслу с использованием роторно-пульсационного аппарата / Е.А. Сафонова, **И.О.**

Миленький // IV Международная научная конференция «Пищевые инновации и биотехнологии». - Кемерово, 2016. - С. 190 – 193.

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

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

8) Бородулин, Д.М. Исследование эффективности применения роторно-пульсационного аппарата для получения хмелевого экстракта / Д.М. Бородулин, Е.А. Сафонова, **И.О. Миленький** // Наука и образование: тенденции и перспективы. Международная научно-практическая конференция - Уфа, 2017. - С 54 – 58.

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

10) **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.

11) **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.

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

Патенты на изобретения

13) Пат. № 2627600 РФ, МПК С12Н3/02, С12F3/02, С12С12/04. Способ производства безалкогольного пивного напитка / Т.П. Лапина, Т.С. Миленькая, А.В Миленький, **И.О. Миленький** // Оpubл. 16.07.2017.

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