

АО «АЛМАТИНСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 664.292.

На правах рукописи

ВЕЛЯМОВ ШУХРАТ МАСИМЖАНОВИЧ

**Разработка оборудования для получения
пектина из столовой свеклы**

6D072400 - Технологические машины и оборудование

Диссертация на соискание степени
доктора философии (PhD)

Научный консультант:
доктор технических наук, профессор
Джингилбаев Сеит Сарсенбаевич

Зарубежный научный консультант:
доктор технических наук, профессор
Актерян Степан Гаро

Республика Казахстан
Алматы, 2020

СОДЕРЖАНИЕ

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ	4
ОПРЕДЕЛЕНИЯ	5
ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	7
ВВЕДЕНИЕ	9
1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА И ПРИМЕНЕНИЯ ПЕКТИНА В ФУНКЦИОНАЛЬНОМ ПИТАНИИ	13
1.1 Состояние рынка пектина в Казахстане и за рубежом. Роль пектина в функциональном питании.....	13
1.2 Производство и переработка столовой свеклы в Казахстане.....	16
1.3 Оборудование для экстракции пектина из растительного сырья.....	18
1.4 Анализ существующих методов повышения интенсивности процесса экстракции БАВ из растительного сырья.....	27
1.5 Постановка задач исследований.....	33
2 РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ЭКСТРАКТОРА И МЕТОДИКИ РАСЧЕТА	35
2.1 Расчет геометрических характеристик экстрактора.....	36
2.2 Расчет основного аппаратного оснащения экстрактора.....	38
2.3 Выводы по второму разделу.....	42
3 МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБОСНОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭКСТРАКТОРА ДЛЯ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ	43
3.1 Методика проведения ферментативной экстракции пектина из растительного сырья.....	43
3.2 Экспериментальное обоснование рациональных параметров аппаратного оснащения экстрактора.....	43
3.3 Определение рациональных параметров режимов работы экстрактора для растительного сырья.....	46
3.4 Методика изучения основных функциональных показателей полученного экстракта пектина из растительного сырья.....	47
3.5 Выводы по третьему разделу.....	47
4 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ФЕРМЕНТАТИВНОЙ ЭКСТРАКЦИИ ПЕКТИНА ПРОТЕКАЮЩЕГО В РАЗРАБОТАННОЙ КОНСТРУКЦИИ ЭКСТРАКТОРА	49
4.1 Изучение процесса ферментативной экстракции пектина.....	50
4.2 Физико-математическая модель процесса ферментативной экстракции пектина.....	55
4.3 Математическая модель процесса экстрагирования.....	56
4.4 Оптимизация параметров процесса ферментативной экстракции пектина на разработанной конструкции экстрактора.....	65

4.5	Выводы по четвертому разделу.....	69
5	ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ. ИЗУЧЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ПОЛУЧЕННЫХ ОБРАЗЦОВ ЭКСТРАКТА. РАСЧЕТ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ.....	71
5.1	Производственные испытания.....	71
5.2	Изучение основных функциональных свойств полученных образцов экстракта пектина столовой свеклы: FRAP метод.....	71
5.3	Определение качества образцов экстракта пектина столовой свеклы.....	73
5.4	Расчет экономической эффективности.....	74
5.5	Выводы по пятому разделу.....	77
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	78
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	80
	ПРИЛОЖЕНИЯ.....	87

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящей диссертации использованы ссылки на следующие стандарты:

СТ РК 2.30-2017 Государственная система обеспечения единства измерений Республики Казахстан. Порядок проведения метрологической аттестации средств измерений;

СТ РК 2.4-2017 Государственная система обеспечения единства измерений Республики Казахстан. Поверка средств измерений. Организация и порядок проведения;

ГОСТ 7.32-2017 СИБИБД. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления;

ГОСТ 26188-2016 Продукты переработки фруктов и овощей, консервы мясные и мясорастительные. Метод определения рН;

СТ РК 2.15-2013 (NEQ) Государственный метрологический контроль и метрологический контроль. Основные положения;

ГОСТ ISO 750-2013 Продукты переработки фруктов и овощей. Определение титруемой кислотности;

ГОСТ ISO 2173-2013 Продукты переработки фруктов и овощей. Рефрактометрический метод определения растворимых сухих веществ;

СТ РК 2011-2010 Вода, продукты питания, корма и табачные изделия. Определение хлорорганических пестицидов хроматографическими методами;

СТ РК 2.1-2009 Государственная система обеспечения единства измерений Республики Казахстан. Термины и определения;

СТ РК 2.3-2009 Государственная система обеспечения единства измерений Республики Казахстан. Эталоны единиц величин. Основные положения, порядок создания, утверждения, хранения, применения и совершенствования;

СТ РК ГОСТ Р51301-2005 Продукты пищевые и продовольственное сырье. Инверсионно-вольт-амперметрические методы определения содержания токсичных элементов (кадмия, свинца, меди, цинка);

ГОСТ 7.1-2003 СИБИБД. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления;

ГОСТ 51434-99 Соки фруктовые и овощные. Метод определения титруемой кислотности;

ГОСТ 29059-91 Продукты переработки плодов и овощей. Титриметрический метод определения пектиновых веществ;

ГОСТ 26927-86 Сырье и продукты пищевые. Метод определения ртути.

ГОСТ 8756.13-87 Продукты переработки плодов и овощей. Методы определения сахаров.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В настоящей диссертации применяют следующие термины с соответствующими определениями:

in vitro - это технология выполнения экспериментов, когда опыты проводятся «в пробирке» - вне живого организма;

антиоксиданты - вещества, которые замедляют окисление;

биологическая ценность - показатель качества пищевого белка, отражающая степень соответствия его аминокислотного состава потребностям организма в аминокислотах для синтеза белка;

витамины - низкомолекулярные соединения органической природы, не синтезируемые в организме человека, поступающие извне, в составе пищи, не обладающие энергетическими и пластическими свойствами, проявляющие биологическое действие в малых дозах;

гидроколлоиды - в пищевой и косметической промышленности - собирательное название гидрофильных полимеров, способных в низкой концентрации образовывать стабильные гидрогели;

детоксикация - процесс разрушения и обезвреживания различных токсических веществ химическими, физическими или биологическими методами;

излучатели ультразвука - устройства, применяемые для возбуждения ультразвуковых колебаний и волн в газообразных, жидких и твердых средах.

классификационные показатели - показатели качества (органолептические, физико-химические, микробиологические, механические и др.), определяющие категорию или сорт какой-либо пищевой продукции;

пищевая продукция - продукты животного, растительного, микробиологического, минерального, искусственного или биотехнологического происхождения в натуральном, обработанном или переработанном виде, которые предназначены для употребления человеком в пищу;

протопектин - водонерастворимая природная форма пектина, содержащаяся в растительной ткани высших растений, гидролизующаяся в присутствии химических реагентов или ферментов с образованием пектина при экстрагировании растительного сырья в водной среде;

пектин - природный полисахарид растительного происхождения, обладает желеобразующими, гелеобразующими и сорбционными свойствами;

пектиновые вещества - высокомолекулярные гетерополисахариды, главным структурным компонентом которых является α-D-галактуроновая кислота (полигалактуронид). Кроме галактуроновой кислоты в значительно меньших количествах (10 - 17%) в составе пектиновых веществ присутствуют также D-галактоза, L-арабиноза, L-рамноза и другие нейтральные моносахариды;

пектинопродукты - продукты, содержащие в составе полисахарид пектин, например экстракт пектина;

стандарт предприятия - стандарт, утвержденный руководителем

предприятия (объединения предприятий) приказом;

токсичные элементы - химические элементы, которые могут отрицательно повлиять на рост и развитие живых организмов, на физиологические процессы. Наиболее токсичными элементами считают ртуть, кадмий, свинец, таллий;

экстракт - концентрированное извлечение из лекарственного растительного сырья или сырья животного происхождения, представляющее собой подвижные, вязкие жидкости или сухие массы;

экстрактор - оборудование для производства процесса экстракции;

экстрагент - селективный растворитель, используемый для экстракции;

экстракция - способ извлечения вещества из раствора или сухой смеси с помощью подходящего растворителя (экстрагента). Для извлечения из смеси применяются растворители, не смешивающиеся с этой смесью;

энтеросорбенты - это продукты, эффективно связывающие в желудочно-кишечном тракте эндогенные и экзогенные соединения, надмолекулярные структуры и клетки.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В настоящей диссертации применяют следующие обозначения:

- B - ширина корпуса камеры, м;
 b - ширина сырьевой ситовой камеры, м;
 C_1 - средняя концентрация пектина в исходном сырье, кг/кг;
 C_2 - средняя концентрация вещества (пектина) в экстрагенте, кг/кг;
 C_p - удельная теплоемкость жидкости, Дж/(кг·К);
 c - скорость ультразвука, м/с;
 D - диаметр излучателя, м;
 d - диаметр лопастей мешалки, м;
 H - высота корпуса камеры, м;
 h_k - высоты сырьевой ситовой камеры, м;
 J - интенсивность ультразвука, кг/м²·с;
 L - длина корпуса камеры, м;
 ℓ - длина сырьевой ситовой камеры, м;
 M - масса нагреваемой воды (экстрагента), кг;
 M_c - масса сырья (принимается в соответствии ТУ), кг;
 N - мощность вала мешалки в рабочий период, Вт;
 n - частота оборотов мешалки, с⁻¹;
 P - пектиновые вещества, %;
 p - величина амплитуды УЗ-давления, Па;
 t_1, t_2 - начальная и конечная температуры воды, К;
 U - длина ближней зоны ультразвуковых волн, м;
 V_c - объем насыпной массы сырья; кг/м³;
 $V_{эк}$ - необходимый объем экстрагента, м³;
 $V_{ск}$ - объем сырьевой камеры, м³;
 β - коэффициент массоотдачи от твердой фазы к жидкой, (кг/кг)·м/с;
 η - вязкость слабоконцентрированного пектинового раствора, Па·с;
 λ - длина волны, м;
 μ - средний динамический коэффициент вязкости, Па·с;
 ρ - плотность экстрагента, кг/м³;
 ρ_n - плотность сырья, кг/м³;
 τ_1 - проектное время нагрева при первом режиме, с;
 A_0 - норма амортизационных отчислений, %;
 $ЗАО$ - затраты на амортизацию оборудования, тыс. тенге;
 $Зо$ - стоимость дополнительного оборудования, тыс. тенге;
 $Зп$ - заработная плата, тг/месяц;
 $Кв$ - суммарная мощность дополнительного оборудования, кВт;
 $Но$ - норма расходов на содержание и текущий ремонт, %;
 $Ос$ - социальный налог и социальные отчисления, %;
 $Цо$ - средняя оптовая цена за единицу продукции, сырья (тонна), тыс. тенге;
 $Чр$ - численность рабочих в смену, чел.;

Цээ - тариф на электроэнергию, тенге/кВт·час.

В настоящей диссертации применяют следующие сокращения:

БАД	- биологически активные добавки;
БАВ	- биологически активные вещества;
ВОЗ	- Всемирная Организация Здравоохранения;
г-ж	- газ-жидкость (среда процесса экстракции);
г-ж-т	- газ- жидкость-твердое тело (среда процесса экстракции);
ж-ж	- жидкость-жидкость (среда процесса экстрагирования);
КОЕ/г	- колониеобразующая единица - это жизнеспособная бактерия, которая, воспроизводясь, может сформировать целую колонию, если она инкубируется в питательной среде;
КПД	- коэффициент полезного действия;
П	- извлекаемый компонент (пектин);
ПАПП	- процессы и аппараты пищевых производств;
ПАХТ	- процессы и аппараты химических технологий;
ПУ	- перемешивающие устройства;
СХТП	- сельхозтоваропроизводители;
УЗ	- ультразвук;
ЦК	- целевые компоненты.

ВВЕДЕНИЕ

Оценка современного состояния решаемой научной проблемы. Технологическое оборудование, посредством которого осуществима глубокая переработка вторичного сырья агроперерабатывающего сектора, является приоритетным направлением развития экономики страны.

При переработке плодов и овощей пектин, содержащийся в них, полностью остается в выжимках - вторичном сырье, которое представляет ценность для получения конкурентоспособных пектинопродуктов (пектинового экстракта, пектинового концентрата, сухого пектинового порошка).

Спрос на пектинопродукты ежегодно растет в связи с особенностями их функциональных свойств, которые оптимальны для людей, проживающих в условиях повышенного загрязнения воздуха, а повседневное потребление пектинопродуктов отвечает запросам обеспечения качества здоровья населения РК [1-3]. Однако на сегодняшний день, до сих пор нет собственного производства в РК и в странах СНГ, в связи с отсутствием универсального и недорогого оборудования позволяющего наладить выпуск пектинопродуктов на действующем пищевом предприятии.

Основанием к разработке данной темы явилось то, что на сегодняшний день отсутствует оборудование позволяющее производить ферментативную экстракцию пектина в интенсивном режиме, за счет использования ультразвукового воздействия на растительное сырье и активного перемешивания экстрагента.

Исходными данными послужили теоретические изыскания отечественных и зарубежных ученых, разработанные ранее конструкции, патенты, результаты исследований и методики расчетов аппаратов для проведения экстракции в системе «твердое тело - жидкость».

Обоснованием необходимости проведения научно-исследовательской работы явилась недостаточная изученность вопроса интенсификации ферментативной экстракции пектина из растительного сырья, отсутствие предложенного эффективного и недорогого оборудования для получения пектина или пектинового экстракта ферментативным способом.

Сведения о планируемом научно-техническом уровне разработки. Разработка конструкции оборудования для проведения ультразвуковой экстракции пектина из растительного сырья и обоснование методики его расчета базирующейся на фундаментальных законах механики и теории экстрагирования в системе «т-ж» свидетельствует о высоком научно-техническом уровне разработки.

Сведения о патентных исследованиях. Проведены патентные исследования отечественных и зарубежных авторов глубиной поиска свыше тридцати лет. Изучены ранее разработанные способы экстракции, а также конструкции оборудования для проведения экстракции пектина.

Полученные данные и сопоставительный анализ позволили сделать вывод, что исследования по влиянию ультразвука при экстракции целевых компонентов из растительного сырья проводились ранее, но изучение

закономерности влияния УЗ на экстракцию пектина из выжимок растительного сырья не обнаружено. Также выявлено, что аналоги позволяющие проводить экстракцию в системе «т-ж» либо малоэффективны для проведения ферментативной экстракции пектина, либо отличаются дороговизной.

Сведения о метрологическом обеспечении научно-исследовательской работы. В основу диссертационной работы положена официальная терминология Международной организации законодательной метрологии. Эксперименты проводились на базе ТОО «Казахский НИИ перерабатывающей и пищевой промышленности» (далее - КазНИИППП).

При проведении исследований использовались поверенные в установленном порядке приборы в уполномоченных для этого государственных органах. Методики выполнения измерений и класс точности приборов соответствуют «Закону об обеспечении единства измерений». В расчетах используются единицы измерений международной системы СИ.

Актуальность работы. Высокий рост спроса на натуральные биологически активные вещества в связи с ухудшением экологической обстановки в городах-мегаполисах определяет задачу перед технологами и проектировщиками необходимость создания нового оборудования, позволяющего эффективно выделять целевые компоненты с высокими функциональными свойствами из продукции АПК [4].

Общеизвестные функциональные свойства пектина вызывают большой интерес, а необходимость его повседневного потребления имеет смысл развивать посредством внедрения нового оборудования позволяющего производить пектин (или экстракт пектина) и создавать новые рецепты продуктов повседневного потребления обогащенных им [5].

Большинство конструкций оборудования для проведения экстракции пектина из растительного сырья имеют ряд существенных недостатков в частности сложность конструкций, громоздкость оборудования и технологических схем, большие эксплуатационные затраты. Существующее оборудование для проведения экстракции ориентированно на технологии с использованием агрессивных сред кислот и щелочей, что исключает его использование непосредственно на предприятии по переработке плодоовощной продукции, а создание удаленных условий приводит к необходимости предварительной заготовки сырья, что является не рентабельным для производителей [6].

Альтернативным путем решения такой задачи является разработка оборудования – экстрактора растительного сырья, позволяющего производить экстракцию пектина биотехнологическим способом, который абсолютно безопасен [7, 8]. Один из таких биотехнологических способов получения пектина (экстракта пектина) разработан и запатентован в РК сотрудниками КазНИИППП - патент Республики Казахстан №29264 [9]. Также разработан проект стандарта предприятия «Концентрат экстракта пектина, полученный из свекольных и морковных выжимок», который прошел экспертизу в АО «Национальный центр экспертизы и сертификации» и получено экспертное заключение № 11/1 с присвоением номера - СТ 103847-1910-ТОО-01-2014.

На сегодняшний день, для успешного внедрения вышеотмеченной отечественной технологии стоит вопрос интенсификации данной технологии посредством разработки эффективного и недорогого оборудования, которое можно использовать на малых и средних предприятиях по переработке плодов и овощей, в Республике Казахстан их более 180-ти [10,11].

Необходимо отметить, что существующее оборудование, предназначенное для проведения ферментации пектиновых веществ, отличается экстенсивностью процесса и низким выходом конечного продукта. Для эффективного извлечения пектина составляющего структуру клетки растительного сырья недостаточно одного ферментативного воздействия. Как показали проведенные ранее опыты, при ферментации пектиновых веществ на стандартном оборудовании выход пектина не достигает и 60% [12,13]. В связи с этим актуальным является разработка технического решения позволяющего увеличить производительность оборудования для экстракции и интенсивность процесса ферментативной экстракции пектина за счет использования ультразвукового генератором и быстроходной мешалки.

Работа выполнена в рамках программно-целевого финансирования МСХ РК по теме НИР: «Разработка технологий глубокой и комплексной переработки плодово-ягодных и овощных культур с целью изготовления биологически активных веществ, для обогащения пищевых продуктов и получения функциональных пищевых продуктов с естественно-оздоровительным эффектом» в КазНИИППП (2015-2017 гг.).

Объекты исследований: технологическое оборудование, оснащенное ультразвуковым генератором и быстроходной мешалкой.

Предмет исследований: технологический процесс ферментативной экстракции пектина, закономерность влияния ультразвукового воздействия на растительное сырье и активного перемешивания экстрагента при ферментативной экстракции пектина.

Цель работы: увеличение производительности и эффективности экстрактора растительного сырья для получения пектина (пектинсодержащего экстракта) столовой свеклы ферментативным способом, разработка универсальной конструкции экстрактора оснащенного ультразвуковым генератором и быстроходной мешалкой пропеллерного типа, методики его расчета и рекомендаций по применению.

Для реализации поставленной цели решались следующие **задачи:**

1) изучение современного оборудования и способов интенсификации процесса экстракции ЦК из растительного сырья;

2) изучение основных кинетических закономерностей процесса ферментативной экстракции пектина из растительного сырья (влияние ультразвукового воздействия, активного перемешивания экстрагента на характер протекания исследуемого процесса) в широком диапазоне изменения режимных параметров;

3) разработка научно-практических подходов к интенсификации процесса ферментативной экстракции пектина из растительного сырья на примере выжимок столовой свеклы;

4) разработка конструктивного решения и аппаратного оснащения оборудования повышающего эффективность технологических процессов ферментативной экстракции пектина из растительного сырья на примере выжимок столовой свеклы.

Научная новизна полученных результатов заключается в том, что впервые:

- разработана математическая модель процесса ферментативной экстракции пектина из растительного сырья, позволяющая рассчитать оптимальные конструктивные параметры экстрактора оснащенного ультразвуковым излучателем и быстроходной мешалкой пропеллерного типа.

- установлены основные кинетические закономерности процесса ферментативной экстракции пектина из растительного сырья на примере выжимок столовой свеклы;

- разработаны принципы создания ресурсосберегающей технологии переработки вторичного растительного сырья - выжимок столовой свеклы, направленные на интенсификацию процесса получения готового продукта;

Практическая ценность работы. Разработан экстрактор растительного сырья, защищенный патентом РК №33150 ([приложение А](#)), позволяющий эффективно проводить ферментативную экстракцию пектина из вторичного растительного сырья (изучено на примере выжимок столовой свеклы) [14].

Разработана научно-обоснованная методика расчета экстрактора растительного сырья оснащенного ультразвуковым генератором и быстроходной мешалкой, ориентированного для экстракции пектина ферментативным способом.

Предложенная конструкция экстрактора, позволяет объединить в себе 2 вида оборудования используемого при ферментативной экстракции пектина из растительного сырья - экстрактор с ферментером [14].

Апробация практических результатов. Опытно-промышленный образец установки изготовлен и прошел производственные испытания, показал высокую эффективность в условиях ТОО «Тургень Эко-Продукт». Внедрение оборудования позволит увеличить доходы перерабатывающих предприятий на 4 386 222,88 тенге за счет расширения ассортимента.

Результаты исследований доложены и обсуждены на расширенном заседании кафедры «Механизация и автоматизация производственных процессов» (АТУ), а также на международных и республиканских научно-практических конференциях.

Научные положения, выносимые на защиту:

- принципы и закономерности экстракции пектина из растительного сырья;

- результаты экспериментальных исследований и рекомендации по их использованию при инженерном расчете экстрактора;

- конструкция и методика расчета основных параметров экстрактора предназначенного для проведения интенсивной ферментативной экстракции пектина из растительного сырья на примере выжимок столовой свеклы.

1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА И ПРИМЕНЕНИЯ ПЕКТИНА В ФУНКЦИОНАЛЬНОМ ПИТАНИИ

1.1 Состояние рынка пектина в Казахстане и за рубежом. Роль пектина в функциональном питании

Широкое вовлечение в оборот переработки - вторичных сырьевых ресурсов посредством создания и внедрения универсального оборудования для современных технологий по глубокой переработке является важным направлением повышения эффективности производства. Не более 15 % вторичных ресурсов перерабатывающего сектора РК используется в дальнейшей глубокой переработке и налаживание производства пектина и пектинопродуктов позволило бы увеличить долю переработки вторичного сырья и производить экспортоориентированную продукцию с высокой надбавленной стоимостью [15, 16].

Потребность в пектине в Республике Казахстан превышает объемы его импорта из зарубежных стран. Из литературных данных известно, что если учесть минимальную профилактическую норму потребления пектина - 2-3 г в сутки, в благоприятных экологически районах, количество его при потреблении в течение года только в виде продуктов обогащенных им из расчета на 100 млн. чел. составит более 85 тыс. тонн [17, с.25].

Пектин - один из самых распространенных полисахаридов, содержащийся в достаточном количестве в растительном сырье - плодах, овощах, корнеплодах и клубнеплодах, яблочных и цитрусовых выжимках и других вторичных ресурсах. Несмотря на это, в настоящее время создалась парадоксальная ситуация: пектин не стал дешевым и доступным [17, с. 26].

Спрос на пектины ежегодно увеличивается, область использования которых расширяется, если принять во внимание появление функциональных продуктов питания нового поколения, наблюдается увеличение использования пектинопродуктов приблизительно на 4-5% в год. Пектин относится к растворимым пищевым волокнам, является гидроколлоидом из числа нутрицевтиков, часто применяется составляющим здорового питания, относительно пектина в последние годы применяется такие термины как «фармацевтический пектин» и «биопектин». Широкий спектр действий пектина терапевтический и профилактический обуславливает его применение для производства лечебно-профилактических препаратов [17, с.26].

На сегодняшний день рынок гидроколлоидов во всем мире оценивается на сумму более семи млрд. долларов США. Ежегодно растет использование пищевых гидроколлоидов в производстве, более подробная статистическая информация по данному вопросу представлена на рисунке 1.

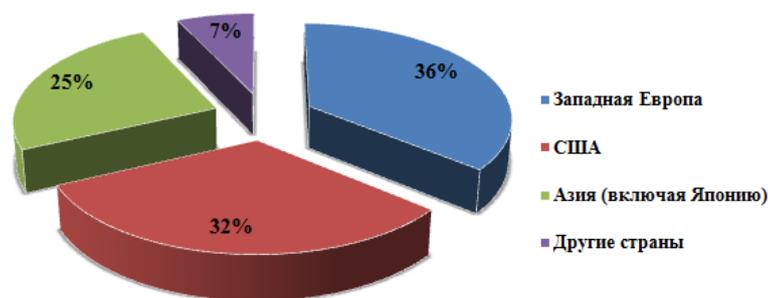


Рисунок 1 - Использование гидроколлоидов в пищевом производстве

Производство пектина из общего объема производства гидроколлоидов составляет около 15% - свыше тридцати тысяч тонн в год, на среднюю сумму в сто пять млн. долларов США (рисунок 2) [18, с.8-9].

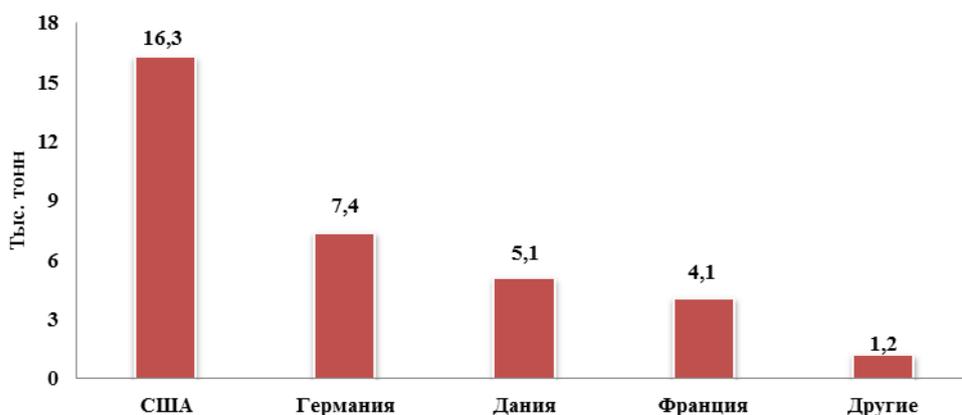


Рисунок 2 - Мировое производство пектина (в среднем в год за период 2017-2019 гг.)

Компания CP Kelco (США) является лидером производства и реализации пектина на рынке во всем мире. Восемь заводов из одиннадцати действующих в Европейском союзе мощностью более двух тыс. тонн пектина в год принадлежит компании CP Kelco [18, с.10].

Компания Herbstreith & Fox KG (Германия) занимает второе место по объему производства пектина с общим объемом производства более семи тыс. тонн в год [18, с.10].

Третье место и около 16% мирового производства пектина приходится на компанию Danisco (Дания). Производство налажено в Мексике, Чехии и Дании в основном из лайма и лимона. Мексиканское отделение Danisco ежегодно производит около пяти тыс. т цитрусовых пектинов [18, с.11].

Около 12% мирового производства пектина и четвертое место в мире принадлежит французской фирме Degussa, имеющая двадцатилетний опыт в части производства систем стабилизации для пищевой промышленности [18, с.12].

В Казахстане и близлежащих странах СНГ собственного производства пектинов нет. Главной причиной, является низкая рентабельность

традиционной технологии для РК. Традиционная технология предусматривает применение химически агрессивных сред, это, в свою очередь, определяет нецелесообразность организации таких производств на действующих перерабатывающих предприятиях. Оторванность пектинового производства обуславливает необходимость заготовки и транспортировки вторичного растительного сырья, что не вызывает интереса у СХТП. Ярким примером подобной реакции СХТП является Бендерский пектиновый завод, крупнейший завод в бывшем СССР. Консервные заводы не были заинтересованы в заготовке пектинсодержащего сырья, и период работы завода составлял всего 3-5 мес. в году. [17, с.30].

Роль пектина в функциональном питании и лечении. Пектин защищает организм от воздействия радиоактивных и тяжелых металлов (свинца, стронция и др.), способствует выведению холестерина, задерживает развитие вредных микроорганизмов в кишечнике [19].

Концентрат пектина и порошок применяют для обогащения блюд специального назначения. Для лиц подверженных контакту с тяжелыми металлами рекомендованы пектиновые диеты. Присутствие в рационе питания пектина улучшает обменные процессы в организме, он нормализует пищеварение, способствует нормальной работе органов и систем в целом [20].

Пектин применяют и как средство, стимулирующее бактерицидную противовирусную и адсорбционную активность организма человека [21]. Комплексообразующие свойства пектина привлекает к себе внимание исследователей при разработке радиопротекторных средств природного происхождения [22].

Сегодня на основе пектинов производят сухие смеси, которые эффективны при высокой интоксикации токсичными веществами в частности тяжелыми металлами и радионуклидами [23-25].

Для профилактики атеросклероза, сердечнососудистых заболеваний восстановления холестерина обмена, снижения уровня липидов и жирных кислот в крови, борьбы с ожирением применяют диету с высоким содержанием пектина [26, 27].

Известно, что действие пектина на бактерии строго индивидуально, он проявляет антибактериальную активность по отношению к неспорообразующим возбудителям пищевых отравлений, дизентерийным бактериям, стафилококкам и несколько слабее к кишечной палочке, подавляя гнилостные процессы, способствует заживлению дефектов в слизистой оболочке толстого кишечника [28].

Пектин - это уникальное средство и нашел очень широкое применение для заживления ран. Он используется в хирургии для обработки ран, и является отличным средством для устранения последствий ожогов [29-30].

Пектин применяется в фармацевтике и медицине в качестве средства для придания вязкости эмульсиям, производства гелей, суспензий, выработки питательных сред, лечения ран и др. Пектин резко снижает вредное гастротоксическое действие лекарств, а также примерно в 5 раз пролонгирует действие препаратов [31].

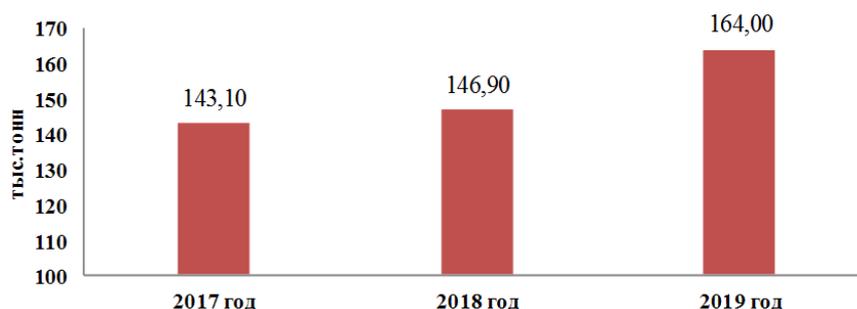
Использование пектинов при разработке новых лекарственных средств улучшает их биофармацевтические свойства, однако для промышленного выпуска отечественных лекарственных препаратов требуется высококачественный пектин, производство которого в нашей стране пока не налажено [32,33].

Присутствие пектина в повседневном питании человека необходимо для стабильного сохранения комплекса жизненно важных витаминов и микроэлементов, а также для полноценного их усвоения. Поэтому разработка эффективного оборудования для извлечения пектина по современным технологиям, и непосредственно обогащение пектином пищевой продукции повседневного потребления является актуальным.

На сегодняшний день в Казахстане имеется разработанная и запатентованная сотрудниками КазНИИППП - биотехнология производства пектинового экстракта, являющаяся экологически-чистым способом получения пектина из растительного сырья. Основной задачей для дальнейшего внедрения технологии является разработка и адаптация недорогого и эффективного оборудования для производства новой продукции на базе действующих предприятий по переработке растительного сырья.

1.2 Производство и переработка столовой свеклы в Казахстане

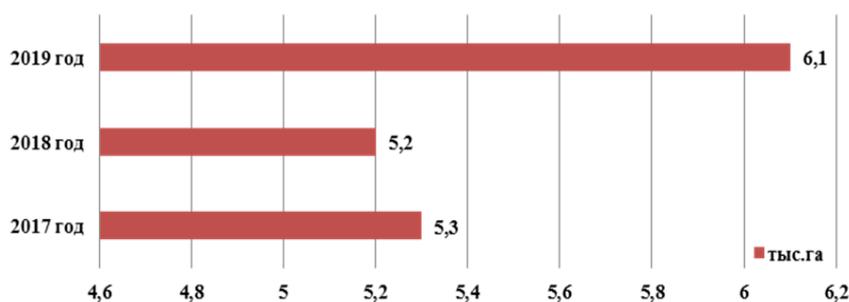
По данным Комитета по статистике МНЭ РК, Республика Казахстан обладает значительным производственным и климатическим потенциалом для выращивания районированных сортов овощей (столовой свеклы сортов Бордо и Қызыл-қоңыр и др.). В целом в Казахстане наблюдается устойчивый рост производства столовой свеклы за последние три года. Так в 2017 году валовой сбор столовой свеклы составил 143,0 тыс. тонн, а в 2019 уже 164,0 тыс. тонн (рисунок 3).



Данные комитета по статистике МНЭ РК

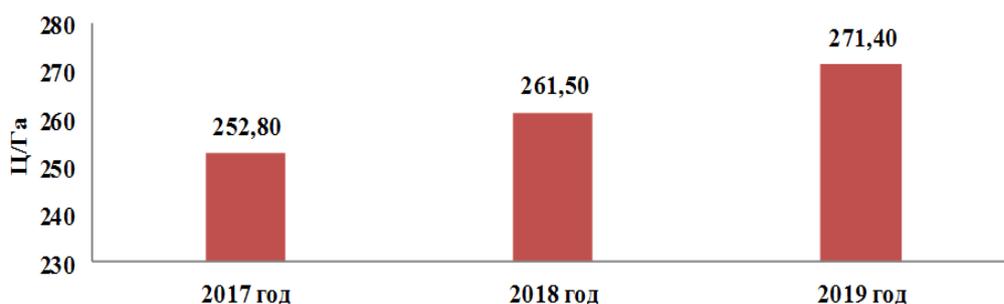
Рисунок 3 - Валовой сбор столовой свеклы в Казахстане за период с 2017 по 2019 годы

Также по данным Комитета по статистике МНЭ РК - увеличивается не только посевная площадь (рисунок 4), но и урожайность (рисунок 5), которая превышает 2,71 тонн с гектара.



Данные комитета по статистике МНЭ РК

Рисунок 4 - Посевная площадь столовой свеклы в Казахстане за период с 2017 по 2019 годы, тыс. га



Данные комитета по статистике МНЭ РК

Рисунок 5 - Урожайность столовой свеклы в Казахстане за период с 2017 по 2019 годы

Приведенные на рисунках 3, 4 и 5 данные свидетельствуют о стабильном росте производства столовой свеклы в Казахстане, республика обладает высоким сырьевым потенциалом в этой области. Что касается переработки столовой свеклы, то на сегодняшний день данное сырье используется не в крупных масштабах. Необходимо налаживание производства плодовоовощных соков на основе сока свеклы в связи с тем, что свекольный сок является высокопитательным и полезным продуктом свойства которого известны каждому [34].

При переработке плодов и овощей пектин, содержащийся в них, полностью остается в выжимках - вторичном сырье, которое представляет ценность для получения конкурентоспособных пектинопродуктов (пектинового экстракта, пектинового концентрата, сухого пектинового порошка) [12, с.19]. Однако данное сырье в лучшем случае используется в качестве корма для сельскохозяйственных животных, либо утилизируется [13].

Оставшиеся выжимки являются ценным сырьем для производства биологически активного вещества - пектина или экстракта содержащего пектин, который в дальнейшем можно применить в качестве БАД-а или обогатителя для соков, что позволит расширить ассортимент и увеличить рентабельность, привлекая внимание покупателей экологически чистыми функциональными продуктами [35].

Накопление пектинов в клетках столовой свеклы. Поскольку пектиновые вещества представляют собой природные органические соединения - полисахариды, то и содержатся они в различных количествах во фруктах,

овошах, корнеплодах. Наиболее богаты содержанием пектина овощи: столовая свекла, морковь, перец, тыква и др., а также фрукты: яблоки, цитрусовые, слива, груши и др. [36].

Аккумуляция сахаров происходит в основном, в цитоплазме клеток листьев и корнеплодов, а полисахариды в частности пектин - в клеточных стенках. Пектин является основным полимером, формирующий клеточные стенки растений [37, с.9].

Существует функциональная разница растворимого пектина и протопектина, локализованных в разных частях растительной клетки, растворимый пектин находится в соке вакуоли зрелых плодов, а протопектин входит в состав клеточной оболочки [38].

Очень важным моментом при разработке техники и технологии производства пектина из растительного сырья является точное представление о преобладающем виде накапливаемого пектина в растительном сырье. Необходимо отметить, что корнеплоды свеклы накапливают больше протопектина, в отличие от плодовых культур, у которых по мере созревания увеличивается количество растворимого пектина, доказательством этого являются микрофотографии клеток корня столовой свеклы в поляризующем свете, приведенные на рисунке 6 [37, с.10].

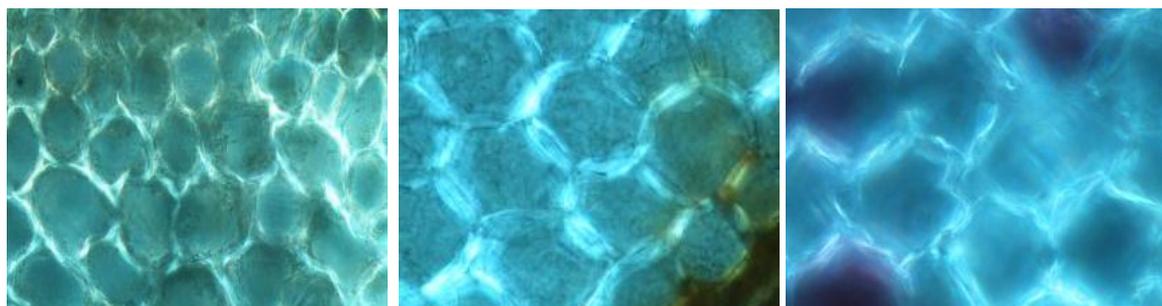


Рисунок 6 - Микрофотографии клеток корня свеклы в поляризующем свете

Приведенные данные об особенностях накопления пектина в клетках столовой свеклы указывают нам на трудоемкость его извлечения, т.е. разработка эффективного оборудования для проведения экстракции является действительно важным для возможности интенсификации процесса экстрагирования пектина. В свою очередь из литературных данных известно, что протопектин обладает более выраженными функциональными свойствами, нежели растворимый пектин.

1.3 Оборудование для экстракции пектина из растительного сырья

Анализ научно-технических источников по вопросу экстракции пектина из растительного сырья свидетельствует о том, что на сегодняшний день, имеются разработки оборудования для проведения экстракции пектина стандартным кислотно-щелочным способом. Что касается ферментативного способа экстракции пектина, который является наиболее щадящим, экологически чистым и пригодным для получения продукта функционального

назначения, то существующие решения конструкции и аппаратного оснащения экстракторов приемлемые для осуществления данного способа экстракции на практике - либо отличаются дороговизной, либо экстенсивностью экстрагирования.

Экстракционные аппараты промышленного типа подразделяются на два вида - периодические и непрерывно действующие. Аппараты периодического действия нашли применение при налаживании производства с небольшим массовым потоком, а аппараты непрерывного действия при большом потоке. В то же время оба типа аппаратов должны обеспечивать протекание процесса в условиях наиболее близких к противотоку при минимальном гидродинамическом сопротивлении относительному движению фаз, соотношении расхода масс экстрагента и твердых частиц и суммарных внутреннем и внешнем диффузионных сопротивлениях [40].

На рисунке 7 предлагается общая классификация основных типов экстракторов [39, с. 340].

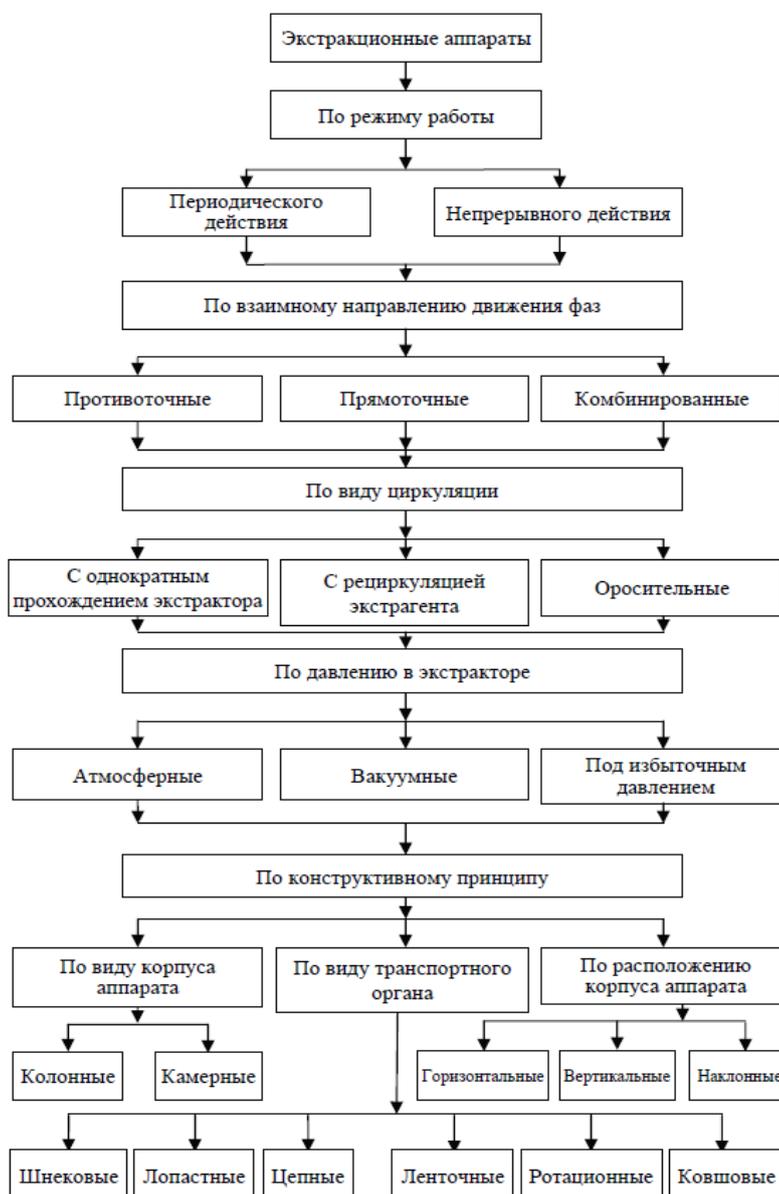


Рисунок 7 - Общая классификация основных типов экстракторов

Скорость протекания процесса данные о тепло- и массопередаче и информация о гидродинамической обстановке или структуре потоков в экстракторе являются необходимыми данными при расчете экстрактора. Основные факторы, влияющие на работу экстрактора [39, с.341]:

1) термодинамические - константы фазового равновесия; эта группа факторов определяет направление процесса, технологические параметры проведения процесса и оказывает влияние на скорость и селективность всего процесса;

2) кинетические - константы скорости и энергии активации основных и побочных процессов;

3) массообменные - коэффициенты массопередачи исходных и промежуточных веществ и конечных продуктов процесса;

4) теплообменные - коэффициенты теплопередачи между фазами и коэффициенты теплопередачи между средой и теплообменными устройствами; величина поверхности внешнего теплообмена;

5) гидродинамические - характеристики межфазной поверхности и перемешивания по сплошной и дисперсной фазам.

Построенные конструкции экстракторов должны точно отражать физическую сущность процесса и иметь достаточно простой математический вид, удобный для практических расчетов и выбора метода оптимизации [39, с.341].

Рассмотрим существующие конструкции экстракторов для растительного сырья разработанных, а также реализуемых на сегодняшний день на рынке.

Фирмой Агромаш производится 3 разновидности экстрактора для растительного сырья, рассмотрим конструкции Российской фирмы.

Экстрактор периодического действия с мешалкой от Агромаш (рисунок 8). Емкость-экстрактор представляет собой сосуд с герметичными люками, подъемной крышкой с механическим подъемником, внутренними решетками. Циркуляция раствора-экстрагента осуществляется с помощью мешалки специальной конструкции. Объем общий составляет 650 литров, мощность электродвигателя привода мешалки, 5 кВт [41].



Рисунок 8 - Экстрактор периодического действия с мешалкой от Агромаш

Недостатком данного экстрактора является отсутствием элементов, которые бы смогли увеличить интенсивность ферментативной экстракции пектина. Данный вид экстрактора пригоден для экстракции пектина из растительного сырья - но ферментативный процесс будет длиться не менее 6 часов, не учитывая другие процессы - набухание сырья, инактивация фермента и т.д.

Линия (установка) гидродинамической экстракции из растительного сырья от Агромаш (рисунок 9) [42]. Гидродинамическая экстракция позволяет интенсифицировать процесс экстракции, уменьшить время экстракции, увеличить количество извлекаемого вещества и уменьшить энергозатраты. Принцип работы: Обрабатываемый продукт помещают в загрузочную емкость с якорной мешалкой, добавляют экстрагент. Согласно технологическому процессу проводится рециркуляция экстрагента через гидродинамический генератор (многоступенчатый роторно-кавитационный гомогенизатор специальной конструкции) [42].



Рисунок 9 - Линия (установка) гидродинамической экстракции из растительного сырья от Агромаш

Интенсификация процесса экстракции достигается за счет пульсирующего воздействия экстрагента на границе раздела «т-ж». При использовании данной установки в несколько раз (по сравнению с обычными способами) сокращается время экстракции, а также увеличивается в 2-2,5 раза выход экстрактивных веществ (фармакологически активного препарата). Экстрактор состоит из загрузочной емкости с теплообменной рубашкой специальной конструкции, - многоступенчатого роторно-кавитационного гомогенизатора специальной конструкции, приемной емкости с пропеллерной мешалкой, трубопроводов, запорной арматуры и пульта управления [42].

Недостатком данного экстрактора для проведения ферментативной экстракции является циркуляция экстрагента, где растворен ферментативный препарат, а значит, уменьшается активность фермента. Для проведения ферментативной экстракции пектина данная конструкция является сложной и

дорогой.

Экстракционное оборудование компании Samtech (Австрия) - DIG-MAZ (рисунок 10). Экстракционные установки Samtech успешно применяют в процессе промышленной переработки растительного сырья в фармацевтической, косметической, пищевой отраслях [43].

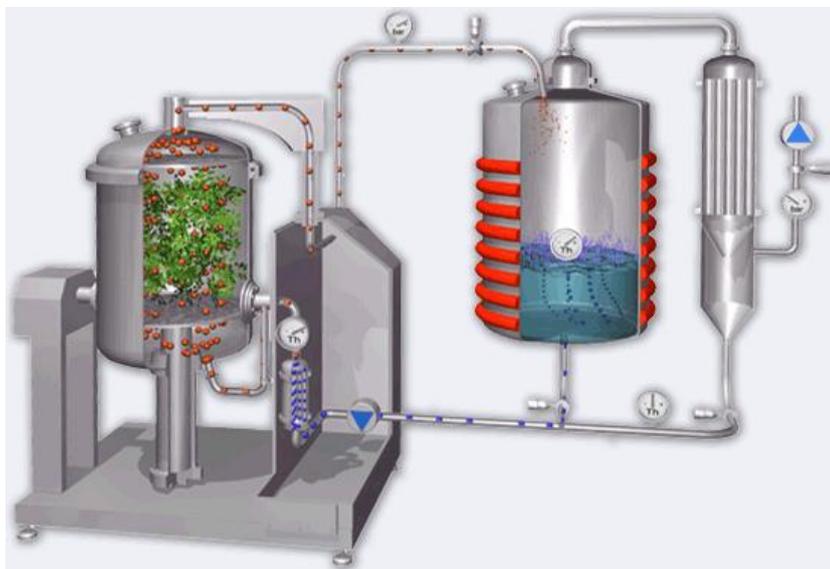


Рисунок 10 - Экстракционное оборудование DIG-MAZ 100 от Samtech

Экстракционное оборудование DIG-MAZ от Samtech - мультифункциональная система, объединяющая в компактном оборудовании наиболее важные технологии по экстракции: перколяцию, дигерирование, мацерацию и возможность дистилляции [43].

Инновационная технология компании Samtech позволяет добиться следующих результатов: получение высококачественных экстрактов; полное истощение сырья; высокое содержание действующих веществ; короткая продолжительность экстрагирования; закрытая циркуляция растворителей; селективная/фракционная экстракция; температура растворителей до 120 °С; концентрация экстракта; интегрированная фильтрация; механическое выжимание сырья; выпаривание под вакуумом; регенерация растворителя [43]. Недостатком использования данного оборудования является очень высокая цена и сложность устройства.

Авторами Ломачинским В.А., Квасенковым О.И., Пентоновым В.Б., Касьяновым Г.И [44] разработано устройство для выделения пектина из плодово-ягодных выжимок. На чертеже показано предлагаемое устройство (рисунок 11). Устройство для выделения пектина из плодово-ягодных выжимок содержит вертикальный цилиндрический корпус 1, выполненный из кольцевых магнитоотрицательных преобразователей 2 и изоляции 3, с двойным конусным днищем 4 и 5, верхнее 4 из которых выполнено перфорированным, 5 снабжено патрубком 6 отвода экстракта, установленный в корпусе 1 приводной вал 7 с мешалкой 8, узел выгрузки шрота и средства 10, 11 и 12 подачи сырья, экстрагента и реагента соответственно. Магнитоотрицательные преобразователи

2 соединены с источником 13 тока высокой частоты [44].

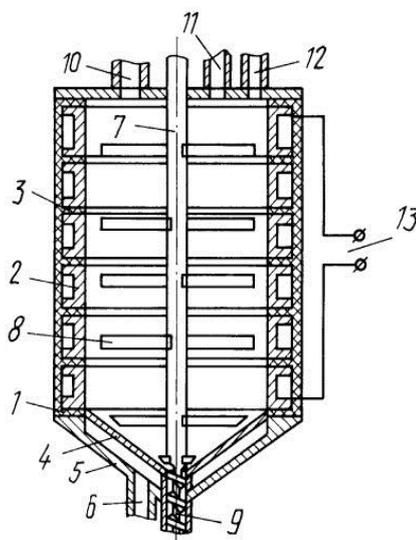


Рисунок 11 - Устройство для выделения пектина из плодово-ягодных выжимок

Устройство работает следующим образом: Выжимки пектинсодержащего сырья, например яблок, средством 10 подают в корпус 1 одновременно с подачей средствами 11 и 12 экстрагента и реагента пероксидазы, создавая в нем смесь заданного состава. При вращении валом 7 мешалки 8 компоненты смеси равномерно распределяются по объему корпуса 1. При подаче от источника 13 тока высокой частоты на кольцевые магнестрикционные преобразователи 2, изолированные изоляцией 3 для исключения диссипации механической и тепловой энергии и взаимогашения когерентных колебаний, создают поле колебаний ультразвуковой частоты в реакционной смеси и нагревают ее до температуры гидролиза протопектиновых соединений используемого сырья. В этих условиях происходит гидролиз протопектиновых веществ, ускоренный наложением поля ультразвуковых колебаний, с образованием водорастворимых пектиновых веществ. Одновременно под действием пероксидазы в поле ультразвуковых колебаний происходит сшивка ферулоильных групп пектиновых веществ, что повышает их желирующую способность. После завершения процесса экстракции гидролиза сшивки экстракт отделяют от шрота фильтрацией через перфорированное днище 4 и удалением по патрубку 6 с днища 5. Шрот удаляют из корпуса 1 через узел 9 выгрузки. Далее цикл работы устройства повторяется [44].

Недостатками вышеописанного устройства являются технологическая сложность изготовления магнестрикционных преобразователей, а также сложность их обслуживания. Площадь боковой поверхности преобразователей, с которых производится излучение, мала, что приводит к неполному использованию возможности ультразвука для экстракции, и низкий КПД его использования, т.к. использование магнестрикционных преобразователей, больших по размерам, нецелесообразно из-за большой потребляемой мощности. Также существенным недостатком аппарата является отсутствие в

нем кавитации и необходимость предварительного измельчения экстрагируемого сырья.

Авторами Квасенковым О.И., Ломачинским В.А [45] разработан экстрактор для растительного сырья. На чертеже изображена схема экстрактора (рисунок 12). Экстрактор для растительного сырья содержит корпус 1 с патрубками 2-6 подачи сырья, подачи экстрагента, рециркуляции экстрагента, отвода грота и отвода мисцеллы соответственно, размещенные в корпусе 1 на полем вала 7 лопастную мешалку 8 с барботером 9, снабженным сверхзвуковыми соплами 10, и полый фильтрующий элемент 11, выполненный в виде тела вращения, полость которого сообщена с патрубком 6 отвода мисцеллы, а также привод 12 вращения, кинетически связанный с валом 7 и фильтрующим элементом 11, и обогреваемый сборник 13, размещенный между патрубками отвода мисцеллы 6 и рециркуляции экстрагента 4, последний их которых сообщен через полость вала 7 с барботером 9 [45].

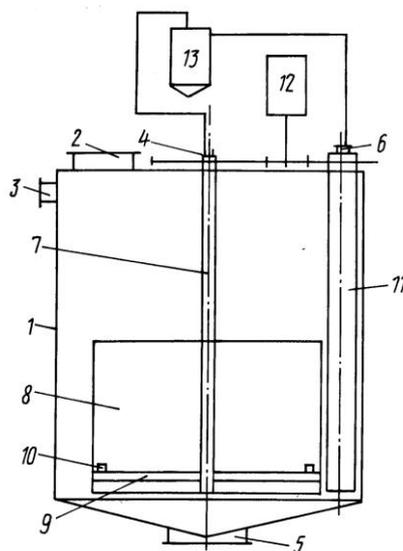


Рисунок 12 - Экстрактор для растительного сырья

При работе экстрактора разработанного авторами Квасенковым О.И. и Ломачинским В.А растительное сырье по патрубку 2 подают в корпус 1. По патрубку 3 туда же заливают экстрагент и включают привод 12. Вращение передается фильтрующему элементу 11 и через вал 7 мешалке 8 и барботеру 9. В поле центробежных сил происходит перемешивание экстракционной смеси и тангенциальная фильтрация мисцеллы, проходящей через фильтрующий элемент 11 в патрубок 6 отвода мисцеллы. В условиях тангенциальной фильтрации забивание пор элемента 121 исключено, что повышает надежность работы экстрактора. Мисцелла из патрубка 6 поступает в обогреваемый сборник 13, в котором экстрагент вскипает, отделяясь от экстракта, и подается через патрубок 4 и полость вала 7 в барботер 9. В соплах 10 пары экстрагента достигают сверхзвуковой скорости и с адиабатным расширением поступают в экстракционную смесь. На выходе из сопел 10 происходит турбулентный срыв потока пара, сопровождающийся образованием и схлопыванием кавитационных полостей. В результате адиабатного расширения и теплообмена

с экстракционной смесью пузырьки пара охлаждаются и конденсируются со схлопыванием кавитационных полостей. В результате в экстракционной смеси генерируются колебания давления ультразвуковых частот, под действием которых разрушаются клеточные мембраны растительного сырья, что приводит к многократному увеличению поверхности контакта фаз и падению диффузионного сопротивления растительного сырья. Это обеспечивает интенсификацию экстрагирования. После завершения экстрагирования мисцеллу полностью сливают из корпуса 1 при работающем приводе 12, который затем отключают и удаляют из корпуса 1 шрот по патрубку 5. Выделенный из мисцеллы экстракт сливают из сборника 13. Далее цикл работы экстрактора повторяется [45].

Недостатком данного устройства, являются большие энергозатраты по причине поддержания высоких температур в обогреваемом сборнике с целью извлечения экстрагента из полученного экстракта. В результате длительного пребывания лабильных биологических веществ при высокой температуре в зоне нагрева происходит их разложение. Также одним из негативных факторов, влияющих на интенсификацию процесса, является то, что ультразвуковая волна не распространяется по всему объему из-за недостаточного перемешивания.

Авторами Нариниянцевым Г.Р. Квасенковым О.И. Кузнецовой Е.Н. Гореньковым Э.С. [46] разработана линия производства пектина. На чертеже показана схема предлагаемой линии (рисунок 13). Линия производства пектина содержит сырьевой питатель 1 и средство 2 подачи воды, соединенные с роторно-кавитационным экстрактором 3, за которым последовательно установлены промежуточный сборник 4, теплообменник 5, соединенная с инокулятором 6 ферментационная установка 7, соединенный со средством 8 подачи сорбента смеситель 9, микрофилтратционная установка 10, ультрафилтратционная установка 11, сушильная установка 12 и фасовочная установка 13 [46].

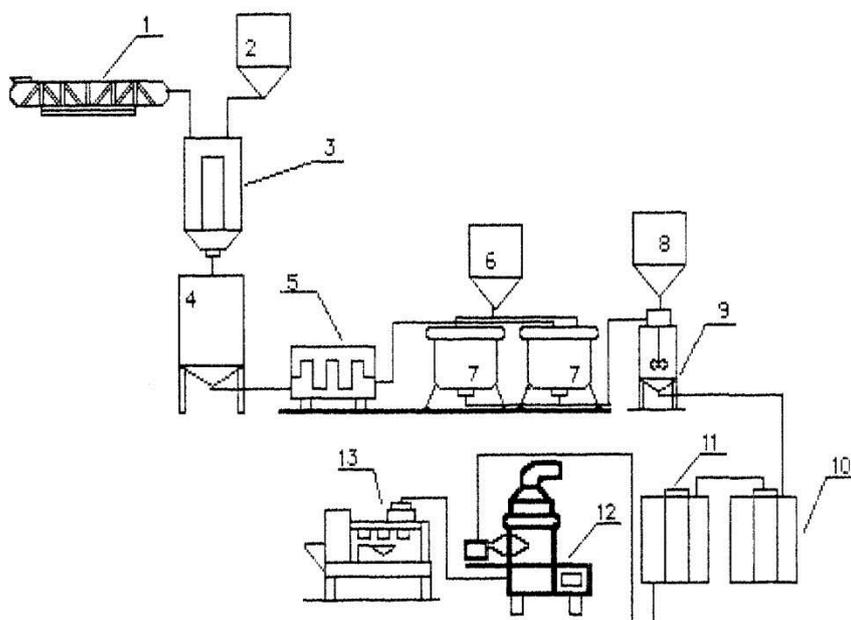


Рисунок 13 - Линия производства пектина

При работе линии разработанной авторами Нариниянцевым Г.Р. Квасенковым О.И. Кузнецовой Е.Н. Гореньковым Э.С. пектинсодержащее растительное сырье, например плодово-ягодные выжимки, створки зернобобовых или хлопчатника, корки бахчевых, кожуру цитрусовых и иные растительные отходы консервного или сельскохозяйственного производства, сырьевым питателем 1 совместно с водой из средства 2 подают в роторно-кавитационный экстрактор 3 в соотношении, обеспечивающем, по меньшей мере, текучесть экстракционной смеси. Полученную таким образом смесь подвергают кавитационной обработке до достижения визуальной однородной консистенции, что, как правило, составляет около 4-6 мин. Далее экстракционную смесь сливают в промежуточный сборник 4 и по мере необходимости прокачивают через теплообменник 5 для прогрева до температуры ферментации и подают в ферментационную установку 7. В нее же подают из инокулятора 6 ферментный препарат или культуру микроорганизма, способствующую ферментализации протопектиновых веществ. В условиях развитой поверхности контакта фаз ферментализация завершается в 1,5-2 раза быстрее по сравнению с традиционными методами его проведения, а разрушение связей пектиновых веществ с целлюлозно-лигнинным скелетом растительных тканей протекает наиболее полно [46].

После завершения ферментализации осуществляют смешивание полученной пульпы с сорбентом при их совместной подаче в смеситель 9 из средства 8 подачи сорбента и ферментационной установки 7. В результате такой обработки происходит коагуляция и седиментация взвесей, отделяемых от жидкой фазы, содержащей пектин, в микрофилтрационной установке 10. Далее жидкую фазу подают на концентрирование и очистку от сопутствующих веществ в ультрафилтрационную установку 11 и на сушку в сушильную установку 12. Полученный на выходе из последней сухой пектин поступает в фасовочную установку 13, в которой его фасуют в герметичную тару или упаковку и отправляют потребителю или на хранение [46].

В данном случае применяется роторно-кавитационный экстрактор и ферментер для проведения ферментативной экстракции пектина из растительного сырья, недостатком является дороговизна оборудования.

Проведенный анализ существующих конструкций экстракторов для растительного сырья, показал, что в Казахстане нет аналогов в подобных разработках, а все существующие машины имеют те или иные недостатки. Наиболее существенными являются:

- отсутствие элементов, которые бы смогли увеличить интенсивность ферментативной экстракции пектина;
- большая материалоемкость и энергоемкость вследствие сложности конструкции, что влияет на себестоимость машин, а это, в свою очередь, делает их невыгодными (дорогими) для использования на малых перерабатывающих предприятиях;
- отсутствие отечественного и высокая стоимость зарубежного оборудования.

1.4 Анализ существующих методов повышения интенсивности процесса экстракции БАВ из растительного сырья

На сегодняшний день, исходя из литературных источников техника и технология, обеспечивающие интенсивное экстрагирование БАВ является приоритетным направлением многих отраслей промышленности, в том числе и пищевой [47, с.701].

Способы извлечение БАВ из растительного сырья можно разделить на две группы [47, с.701]:

- традиционные;
- перспективные - методы интенсификации экстрагирования.

Необходимо отметить, что по сей день, большинство предприятий применяют традиционные методы - мацерация, вываривание, механический отжим и другое, а перспективные методы очень медленно внедряются на пищевых предприятиях по производству БАВ в связи с тем, что традиционные методы являются относительно малозатратными [48, 49].

Наиболее традиционными и старыми способами являются вываривание и мацерация. Мацерация - это длительное вымачивание (достигает 2 недель), растительного сырья с целью разрыхления клеточных стенок и обеспечение тем самым дальнейшего растворения экстрагированных веществ [47, с.701].

Перколяция или просачивание - традиционный способ изготовления экстрактов и настоев, при перколяции, растворитель пропускается через слой измельченного сырья и «вымывает» ЦК. Часто пользуются сочетания процессов настаивания и перколяции. Однако указанные способы не отвечают требованиям интенсифицированных процессов экстракции [50].

Вихревой метод экстракции (турбоэкстракция) - объединяет активное перемешивание и измельчение сырья в среде экстракта с помощью мешалок с острыми лопастями, вращающихся на высокой скорости. Недостатком данного метода является сложность очистки за счет высокой степени измельчения сырья [51].

Общеизвестно, что степень измельчения, тип экстрагента, разность концентрации, давление, температура, продолжительность извлечения и гидродинамические условия - это те регулируемые параметры, которые влияют на скорость и степень извлечения ЦК. Отдельные из перечисленных факторов реализуются в традиционных способах экстракции [52-53].

Сегодня для интенсификации экстракции ЦК используют силовые поля в качестве воздействия на сырье: электрическое, ультразвуковое, импульсное, дискретно-импульсное и др. Однако, большая часть перечисленных методов по сей день находится на стадии лабораторных или полупромышленных испытаний, что указывает на ряд нерешенных теоретических и практических задач [47, с.702].

Действие электрического тока на экстракционный процесс сегодня интересует многих ученых. Клеточные мембраны нарушают гомогенность растительного сырья и массообменные процессы в таких системах носят электрохимический характер. Следовательно, зависимость от внешнего электрического воздействия неизбежна, и проницаемость мембран меняется, в

случае если электрический ток проходит через обрабатываемое сырье и разрушает клетки [54, 55, 57].

Действие тока может приводить как к увеличению пропускной способности мембран, так и к обратному эффекту к данному выводу пришли ученые, изучая процесс электрических воздействий на клеточном уровне [57].

Внутридиффузионный (массообменный) процесс является определяющей стадией завершения экстрагирования, движущей силой которого является разность концентрации в экстрагенте (растворителе) и растворе веществ. Поэтому для интенсификации процессов извлечения ЦК необходимо ускорение массообмена в системе «ж-т» [58]. Метод обработки твердых тел, находящихся в жидкости с помощью электрических разрядов является перспективным с точки зрения подвода к системе энергии и преобразования ее в кинетическую энергию [59].

В результате появились модификации этого метода, такие как: электроимпульсный; электрогидравлический; мембранный и электродинамический. Скачкообразному повышению температуры канала способствует разряд в жидкости, импульс давления (гидроудар) образуется за счет парогазовой полости и ее расширения с большой скоростью [60 - 62].

Однако ряд авторов отмечают отрицательные явления при продолжительной обработке импульсами напряжения, которые вызывали нарушение структуры некоторых БАВ [63, 64].

Кроме этого, происходит насыщение экстракта продуктами экстрагирования и эрозии электродов, что приводит к высокой электропроводности и повышению токов утечки [65]. Все перечисленные отрицательные моменты, а также отсутствие единого взгляда в публикациях, посвященных пробою жидкости, сложность аппаратного и технологического оформления сдерживают широкое внедрение данных технологий в производство. Но все же на некоторых пищевых и фармацевтических предприятиях были внедрены эти прогрессивные методы [66, 67].

Одним из перспективных «инструментов» в технологии экстракции БАВ из растительного сырья является ультразвук. Особенности физического и химического воздействий ультразвука на структуру вещества обуславливает его широкое применение. На сегодняшний день имеется большое разнообразие технологий обеспечивающих ультразвуковой процесс растворения, эмульгирование, получение тонкодисперсных суспензий, пропитки, акустической сушки, мойки и очистки разнообразных изделий, посола пищевых продуктов, предпосевной обработки семян, экстрагирования веществ, сварки термопластических материалов, склеивания деталей, механической размерной обработки и др. [68-76].

1.4.1 Интенсификация процесса экстракции под действием ультразвука

Широкое применение нашел ультразвук в пищевой и фармацевтической промышленности, при производстве соков из ягод и плодов [77, 78]. Воздействие ультразвука ускоряет процесс перемешивания системы сырье -

экстрагент и, как следствие, ускоряет стадии замачивания, диспергирования и массообмена [79, 80].

Доказано, что ультразвуковым воздействием в диапазоне частот 19 - 1500 кГц возможно извлекать практически все известные соединения из растительного сырья [81].

Принято, что интенсификация процесса происходит за счет следующих факторов: ускорение обтекания, увеличение степени пропитки твердого тела жидкостью, повышение коэфф. внутренней диффузии, эффект кавитации, приводящий к разрыву структур и изменению дисперсности пористых тел [82].

В связи с этим под воздействием УЗ происходит активное разрушение тканей клетки растительного сырья изнутри, что приводит к интенсификации процесса экстрагирования и повышению содержания ЦК в экстрагенте [47, с.704].

Помимо сокращения диффузионных ограничений под воздействием акустического поля, значение для ускорения процесса имеют такие процессы как диспергирование и нарушение мицеллярной структуры экстрагируемого вещества. Разрушение мицеллярной структуры экстрагента другими известными методами не удается, достигнуто только с помощью акустических колебаний. [83].

Доказано действие УЗ на повышение межфазной удельной поверхности реагентов. Разрушение твердой фазы и поверхностное трение между частицами твердой и жидкой фаз обеспечивают процесс диспергирования [84].

Звукокапиллярный эффект УЗ ускоряет вытеснение пузырьков воздуха которые закупоривают капилляры и замедляют процесс замачивания, тем самым создает условия для растворения ЦК в жидкости [85].

Не малое количество исследований посвящено области УЗ интенсификации различных гомо- и гетерогенных процессов, выделению из смесей сплавов необходимых веществ, а также очистке вод, почв и воздуха. К примеру, описаны ультразвуковая экстракция диметионата [86], экстракция антител из клеток [87], экстракция гербицидов из почвы с использованием УЗ [88], эндоскопическая экстракция жировой массы с помощью УЗ скальпеля [89], жидкофазная экстракция полициклических ароматических углеводородов из загрязненных вод с помощью УЗ [90], экстракция полициклических ароматических углеводородов из лесных почв [91]. Ультразвуком даже выделяют из микроорганизмов аминокислоты и белки с сырым вкусом для придания вкусовых качеств различным сырам [92], производят выделение из клеток фермента эндонуклеазы [93], осуществляют твердожидкостную УЗ экстракцию селена из биологических образцов [94].

Кинетика УЗ экстракции БАВ зависит от принадлежности к определенной химической группе, а степень извлечения растет в ряду: масла - алкалоиды - фуранохромы - флавоноиды - сапонины - гликозиды [95]. При использовании УЗ наблюдается не только ускорение процесса, но и сравнительное увеличение выхода продукта [96].

Преимущества УЗ экстракции по сравнению с другими способами: отсутствие применения ручного труда, сокращение продолжительности

технологических процессов [97].

Из недостатков проведения процесса в условиях УЗ является разогрев раствора, и, следовательно, разрушение некоторых классов БАВ [97].

К числу положительных факторов использования УЗ, способствующих интенсификации процесса, относятся [98]:

- свойства звуковых и ультразвуковых колебаний предотвращать экстракцию пористых частиц твердыми инертными примесями;
- ускорение пропитки твердого тела жидкостью;
- кавитационный эффект, влияющий на структуру пористых тел и приводящий к появлению микротрещин;
- увеличение коэффициента внутренней диффузии;
- увеличение скорости обтекания.

Решающим фактором ускорения процессов извлечения протопектина из структуры клетки является ее механическое разрушение за счет эффекта кавитации при УЗ обработке растительного сырья. При действии акустических волн происходит образование и рост парогазовых пузырьков в жидкости, которые колеблются, пульсируют и схлопываются (быстро сжимаются и могут растворяться в жидкости). Образование и движение такого рода пузырьков принято называть кавитацией - нарушением сплошности жидкости [98].

Вопросам определения устойчивости извлекаемых БАВ после УЗ воздействия посвящено не так много исследований ученых. Не установлены зависимости степени разрушения БАВ от частоты УЗ, его интенсивности и молекулярной массы обрабатываемых веществ [47, с.704].

Таким образом, выбор оптимальных параметров удельной нагрузки, интенсивности и частоты УЗ, продолжительности озвучивания, числа и положения УЗ излучателей и т. д. для отдельных видов сырья, является важным для решения проблемы интенсификации технологических процессов извлечения БАВ из растительного сырья [47, с.704].

1.4.2 Перемешивающие устройства применяемые в пищевых производствах для интенсификации тепло- и массообменных процессов

Поскольку для проведения ферментативной экстракции пектина из растительного сырья необходимо обеспечить активное перемешивание жидкой среды с целью равномерного нагревания и активного «вымывания» пектина из растительного сырья рассмотрим основные Перемешивающие устройства применяемые в пищевых производствах для интенсификации тепло- и массообменных процессов.

Перемешивание жидких сред производят следующими способами: механическим с помощью мешалок, циркуляционным, пневматическим, и статическим [100].

Для интенсификации биохимических, гидромеханических, тепло- и массообменных, процессов в системах «ж-ж» «г-ж» и «г-ж-т» используют механический способ перемешивания и осуществляют его посредством мешалок. Механическая мешалка - это устройство представляющее

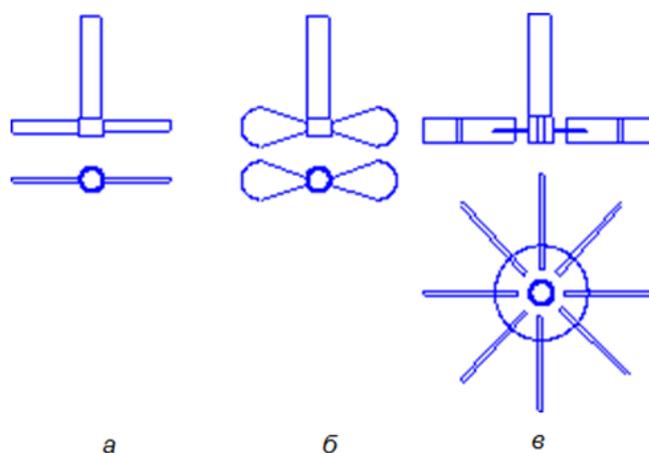
комбинацию лопастей, насаженных на вращающийся вал [101, с.19].

Применяемые в пищевых производствах перемешивающие устройства (ПУ), служащие для перемешивания пластичных и сыпучих масс разделяются на две группы: в 1-ю группу входят турбинные, лопастные и пропеллерные, во 2-ю - шнековые, специальные - винтовые, ленточные, ножевые, рамные и другие [102].

По частоте вращения рабочего органа, ПУ делятся на тихоходные и быстроходные [102].

В пищевой промышленности для перемешивания жидких сред применяются: быстроходные ПУ - турбинные, пропеллерные мешалки, а также тихоходные ПУ - лопастные, ленточные, якорные и шнековые мешалки [101, с. 19].

Механические ПУ состоят из трех основных частей: мешалка, вал и привод. Рабочим элементом устройства является мешалка, закрепляемая на вертикальном, горизонтальном или наклонном валу. Привод может быть осуществлен от электродвигателя (для быстроходных мешалок), или клиноременную передачу, или через редуктор, [109, с.110]. По конструкции ПУ различают мешалки пропеллерные, турбинные, лопастные, а также специальные (рисунок 14) [109, с.111].



а - лопастная; б - пропеллерная; в - турбинная

Рисунок 14 - Основные типы мешалок

По типу создаваемого потока жидкости ПУ подразделяются на - обеспечивающие радиальное, тангенциальное, осевое и смешанное течение [109, с.111].

В химической технологии широкое применение нашли ПУ: лопастные, турбинные, пропеллерные и специальные: барабанные, листовые, вибрационные, дисковые и др. [109, с.111].

Интенсивность перемешивания ПУ для обеспечения заданной эффективности перемешивания назначается на основании опытных данных. В связи с этим при подборе ПУ необходимо установить тип, размеры и число оборотов мешалки, которые обеспечивали бы назначенную интенсивность, а также определить мощность двигателя для мешалки. На основании

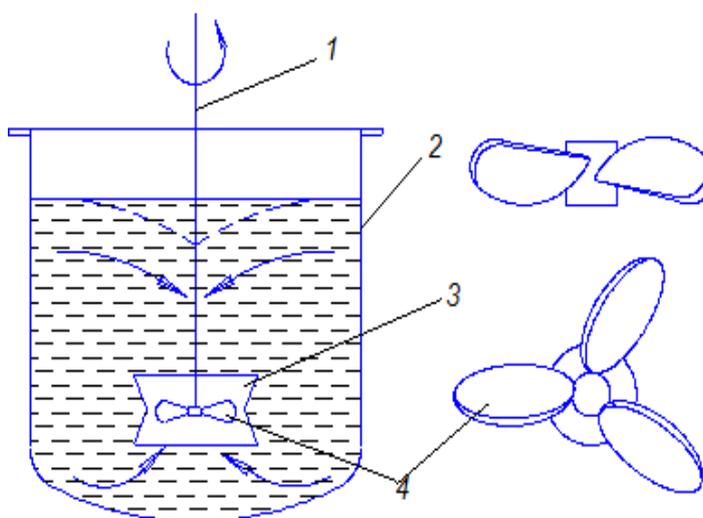
практических данных установлено, что при работе ПУ различного типа в аппаратах определенным образом создаются направленные токи жидкости [109, с.111].

Лопастные ПУ отличаются простотой конструкции и низкой стоимостью изготовления, их используют преимущественно для перемешивания жидкостей с небольшой вязкостью (до 0,1 Па·с), растворения и суспензирования твердых веществ с малым удельным весом, а также для грубого смешения жидкостей вязкостью меньше 20 Па·с. [109, с.112].

Недостатки лопастных ПУ [109, с.112]:

- малая интенсивность перемешивания густых и вязких жидкостей,
 - полная непригодность для перемешивания легко расслаивающихся веществ.
- главным образом создают только горизонтальные токи и не могут обеспечить хорошего перемешивания во всех слоях жидкости.

Решением вышеотмеченных недостатков является использование пропеллерных ПУ (рисунок 15), переменный угол наклона поверхности лопасти, позволяет направлять частицы жидкости в различные стороны, в результате возникают встречные токи, ускоряющие процесс перемешивания [109, с.112].



1- вал; 2 - корпус аппарата; 3 - диффузор; 4 - пропеллер

Рисунок 15 - Пропеллерная мешалка

Как указано на рисунке 15 для улучшения циркуляции жидкости пропеллерные ПУ часто помещают в диффузоре. Диффузор - это стакан, имеющий форму цилиндра или слегка усеченного конуса [109, с.112].

Пропеллерные ПУ применяют для активного перемешивания маловязких жидкостей, взмучивания осадков, содержащих до 10 % твердой фазы с размерами частиц до 0,15 мм, приготовления суспензий и эмульсий. Пропеллерные ПУ непригодны для перемешивания жидкостей с вязкостью более 0,6 Па·с или жидкостей, с высокой плотностью твердой фазы [109, с.113].

Турбинные ПУ применяют для интенсивного перемешивания и смешения жидкостей с вязкостью до 50 Па·с. Турбинные ПУ пригодны для тонкого

диспергирования, быстрого растворения или выделения осадков в больших объемах. Традиционно данный вид ПУ состоит из одного или нескольких центробежных колес (турбин), укрепленных на вертикальном валу. [109, с.113].

Листовые мешалки имеют лопасти большей ширины, чем лопастные, относятся к ПУ, обеспечивающим тангенциальное течение перемешиваемой среды. Кроме чисто тангенциального потока, который является преобладающим, верхние и нижние кромки мешалки создают вихревые токи, подобные тем, которые возникают при обтекании жидкостью плоской пластины с острыми краями. Листовые ПУ традиционно используют для растворения кристаллических веществ [109, с.113].

Барабанные мешалки состоят из двух цилиндрических колец, соединенных между собой вертикальными лопастями прямоугольного сечения. Мешалки этой конструкции создают значительный осевой поток и применяются для проведения газожидкостных реакций, получения эмульсий и взмучивания осадков. Барабанные ПУ применяются для получения эмульсий, взмучивания осадков, проведения газожидкостных реакций [109, с.114].

Дисковые мешалки представляют собой один или несколько гладких дисков, вращающихся с большой скоростью на вертикальном валу. Течение жидкости в аппарате происходит в тангенциальном направлении за счет трения жидкости о диск, причем сужающиеся диски создают также осевой поток. Иногда края диска делают зубчатыми. Дисковые ПУ применяются для перемешивания больших объемов жидкостей - до 4 м³ [109, с.114].

Для проведения интенсификации ферментативной экстракции пектина необходимо обеспечить равномерность процессов тепло- и массообмена в среде экстрагента с малой вязкостью, в связи с этим пропеллерные мешалки пригодны для интенсификации экстракции пектина поскольку являются недорогими и применяются для интенсивного перемешивания маловязких жидкостей, взмучивания осадков, содержащих до 10 % твердой фазы с размерами частиц до 0,15 мм.

1.5 Постановка задач исследований

Анализ современного состояния рынка пектина и переработки столовой свеклы в Республике Казахстан позволил сделать следующие выводы:

- разработка оборудования для осуществления процесса ферментативной экстракции пектина из столовой свеклы имеет смысл, если в стране имеется необходимое количества сырья, анализ данных показал, что в Казахстане развивается стабильное производство столовой свеклы, которое в последние годы увеличивается, т.е. республика обладает высоким сырьевым потенциалом в этой области.

- при разработке оборудования для экстракции пектина из растительного сырья необходимо использование современных методов интенсификации, поскольку как показали данные о накоплении пектина в столовой свеклы, видно, что большая его часть составляет непосредственно структуру клетки, которую необходимо разрушить посредством механического воздействия.

- проведенный анализ существующих конструкций экстракторов для растительного сырья, показал, что в Казахстане нет аналогов в подобных разработках, а все существующие конструкции имеют те или иные недостатки, наиболее существенными являются: отсутствие элементов, которые бы смогли увеличить интенсивность ферментативной экстракции пектина; большая материалоемкость и энергоемкость вследствие сложности конструкции, что влияет на себестоимость машин, а это, в свою очередь, делает их невыгодными (дорогими) для использования на малых перерабатывающих предприятиях.

- для разработки экстрактора с аппаратурным оснащением позволяющим интенсифицировать процесс экстракции пектина был проведен анализ существующих методов повышения интенсивности процесса экстракции биологически активных веществ из растительного сырья. В результате выявлено, что ультразвуковой метод интенсификации выхода целевых компонентов из растительного сырья является наиболее современным, однако требует дополнительных исследований зависимостей. Использование ультразвукового воздействия на растительную клетку создаст эффект кавитации в клетке растительного сырья, что приведет к ее разрушению, в связи с этим использование ультразвукового генератора в конструкции экстрактора имеет смысл изучить.

- следует отметить, что для проведения интенсификации ферментативной экстракции пектина необходимо обеспечить равномерность процессов тепло- и массообмена в среде экстрагента с малой вязкостью, в связи с этим пропеллерные мешалки которые применяют для интенсивного перемешивания маловязких жидкостей, взмучивания осадков, содержащих до 10 % твердой фазы с размерами частиц до 0,15 мм, являются достаточно эффективными для перемешивания экстрагента.

На основании проведенного анализа осуществлена постановка задач исследований:

- изучение современного оборудования и способов интенсификации процесса экстракции ЦК из растительного сырья;

- изучение основных кинетических закономерностей процесса ферментативной экстракции пектина из растительного сырья (влияние ультразвукового воздействия, активного перемешивания экстрагента на характер протекания исследуемого процесса) в широком диапазоне изменения режимных параметров;

- разработка научно-практических подходов к интенсификации процесса ферментативной экстракции пектина из растительного сырья на примере выжимок столовой свеклы;

- разработка конструктивного решения и аппаратурного оснащения оборудования повышающего эффективность технологических процессов ферментативной экстракции пектина из растительного сырья на примере выжимок столовой свеклы.

2. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ЭКСТРАКТОРА И МЕТОДИКИ РАСЧЕТА

На основе проведенного литературного анализа, видно, что на сегодняшний день разработка оборудования позволяющего экстрагировать пектин из растительного сырья ферментативным способом в интенсивном режиме является актуальной задачей. Ферментативный способ производства пектина в классическом представлении является продолжительным ввиду того, что нерастворимый пектин (обладающий высокими функциональными свойствами), является структурным звеном растительной клетки и для увеличения его выхода необходимо применение современных методов и аппаратов позволяющих разрушить структуру клетки и увеличить выход пектина. Одним из таких современных способов интенсификации процесса экстракции БАВ является применение ультразвука. Однако литературных данных о зависимостях влияния ультразвука на выход пектина при ферментативной экстракции нет, в связи с этим была поставлена задача разработки конструкции экстрактора оснащенного УЗ генератором и исследование его влияния на выход пектина.

Кроме того, основной задачей при разработке нового оборудования являлось обеспечение компактности конструкции и простоты его использования. Необходимо отметить, что для проведения ферментации, достаточно периодического перемешивания среды и постоянной температуры экстрагента, поэтому для обеспечения равномерного тепло- массообмена в среде экстрагента, выбрана быстроходная мешалка пропеллерного типа для перемешивания маловязкой среды. Установление влияния активного перемешивания экстрагента является основной задачей исследования с целью определения зависимости на выход пектина и оптимальных параметров перемешивающего устройства.

Таким образом, принято, что экстрактор растительного сырья, посредством которого будет осуществляться ферментативная экстракция пектина, будет оснащен ультразвуковым генератором, нагревателем, а также быстроходной мешалкой пропеллерного типа. На рисунке 16 изображена структурная модель предложенного экстрактора.



Рисунок 16 - Структурная модель экстрактора растительного сырья

При разработке конструкции экстрактора растительного сырья основное внимание уделялось расположению растительного сырья в зоне акустического поля, а также возможности погружения и извлечения растительного сырья из среды экстрагента. При разработке конструкции стремились к обеспечению ее простоты при проведении процесса ферментации, возможности максимально разрушения структуры растительной клетки за счет воздействия УЗ, а также возможности создания необходимых условий тепло- и массообмена в среде экстрагента.

Далее будут рассмотрен расчет ключевых элементов конструкции экстрактора растительного сырья используемого для получения пектина ферментативным способом.

2.1 Расчет геометрических характеристик экстрактора

Форма сосуда не представляет значительного интереса, поскольку при ферментативной экстракции ключевым моментом является полное погружение растительного сырья в среду экстрагента. Предложенная геометрическая форма выбрана из расчета простоты сборки и дешевизны. Далее рассмотрим сам расчет геометрических характеристик экстрактора.

1) Расстояние до высоты слоя растительного сырья выкладываемого на ситовое днище не должно превышать длины ближней зоны ультразвукового излучателя U . Величина U рассчитана в расчете ниже (формулы 15-17). В соответствии с нормами пищевой и химической аппаратуры ситовое устройство изготавливаем из тонколистовой стали пищевых марок (X18H10T) отверстиями диаметром 1,5 мм. Массу загружаемого сырья обозначаем как M_c . Средняя насыпная плотность набухшего сырья ρ_n определяется экспериментально или находим в справочных данных.

2) Объем насыпной массы сырья в ситчатой камере для сырья V_c рассчитываем по следующей формуле:

$$V_c = \frac{M_c}{\rho_n}, \quad (1)$$

где: M_c - масса сырья (принимается в соответствии ТУ), кг; ρ_n - плотность сырья, определяется экспериментально или находим в справочных данных, кг/м³.

3) По конструктивно-технологическим соображениям (с учетом объема, занимаемого сырьем и оптимальных размеров ультразвукового излучателя) принимаем длину и ширину основания камеры равными значениями. Тогда высота слоя насыпного сырья определится по формуле:

$$h_c = \frac{V_c}{\ell^2}, \quad (2)$$

где: V_c - объем насыпной массы сырья; кг/м³; ℓ - длина сырьевой ситовой

камеры, м.

С учетом порозности при засыпке сыпучего сырья необходим запас (по рекомендуемым нормам проектирования и СНиПов - минимум 15 % от расчетной высоты h_c) пространства в связи с этим при расчете высоты необходимо учитывать данный факт.

4) Определяем высоту сырьевой ситовой камеры h_k :

$$h_k = h_c + U + h_{уз}, \quad (3)$$

где: h_c - высота слоя насыпного сырья, м; $h_{уз}$ - высота фланцевой части корпуса излучателя (замеряется вручную), м; U - длина ближней зоны звукового поля (рассчитывается по формулам 65-67), м.

5) Рассчитываем объем сырьевой ситовой камеры $V_{ск}$:

$$V_{ск} = \ell \cdot b \cdot h_k, \quad (4)$$

где: ℓ - длина сырьевой ситовой камеры, м; b - ширина сырьевой ситовой камеры, м; h_k - высоты сырьевой ситовой камеры, м.

6) Необходимый объем для экстрагента (вода пресная) обозначим как $V_{эк}$, принимаем данное значение с учетом технологического запаса (по рекомендуемым нормам проектирования и СНиПов - минимум 15%) - $1,15 \cdot V_{эк}$.

7) Полный объем (V_0) корпуса определяем по следующей формуле:

$$V_0 = 1,15 \cdot V_{эк} + V_{ск}, \quad (5)$$

где: $V_{эк}$ - необходимый объем экстрагента, m^3 ; $V_{ск}$ - объем сырьевой камеры, m^3 .

По конструктивно-технологическим соображениям, исходя из норм проектирования ПАПП и СНиПов, с учетом взаимного расположения сырьевой камеры и камеры для воды примем соотношение габаритных размеров:

$$L : B : H = 1 : 0,85 : 0,6, \quad (6)$$

где: L - длина корпуса камеры, м; B - ширина корпуса камеры, м; H - высота корпуса камеры, м.

тогда полный объем (V_0) корпуса равен:

$$V_0 = L \cdot B \cdot H,$$

выражаем значения через L :

$$V_0 = L \cdot 0,85L \cdot 0,6L, \text{ Имеем:} \\ V_0 = 0,51 \cdot L^3,$$

тогда размеры корпуса будет рассчитываться по формулам:

$$L = \sqrt[3]{\frac{V_0}{0,51}} \quad (7)$$

$$B = 0,85 \cdot L \quad (8)$$

$$H = 0,6 \cdot L \quad (9)$$

8) На основании правил конструкторского проектирования, фактические размеры конструкции необходимо принимать с учетом толщины стенок сырьевой камеры и технологического запаса (минимум 0,5%).

Ниже представлен чертеж и модели экстрактора рассчитанного на экстракцию 1 кг растительного сырья (рисунок 17).

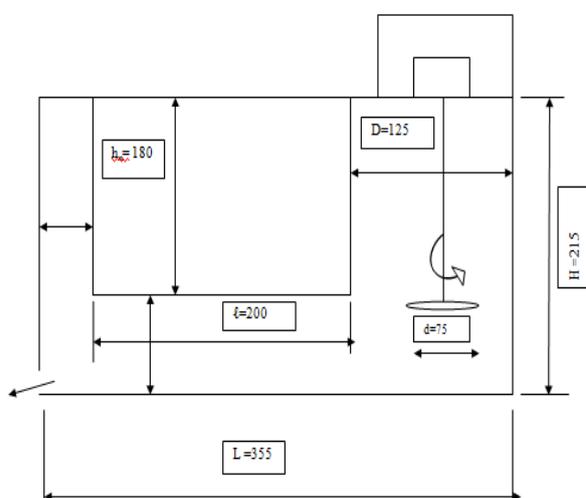


Рисунок 17 - Чертеж экстрактора рассчитанного на загрузку 1 кг растительного сырья

2.2 Расчет основного аппаратного оснащения экстрактора

Основным аппаратным оснащением предлагаемой конструкции экстрактора являются: лопастная мешалка пропеллерного типа, ультразвуковой генератор и нагревательный элемент. Далее рассмотрим более подробный расчет перечисленных ключевых элементов предлагаемой конструкции экстрактора.

2.2.1 Расчет перемешивающего устройства

1) Для расчета рабочей мощности перемешивания применяется критериальное уравнение Эйлера:

$$Eu_M = \frac{N}{\rho \cdot n^3 \cdot d^5}, \quad (10)$$

где: Eu_M - критерий Эйлера (критерий мощности); N - мощность на валу мешалки в рабочий период, Вт; ρ - средняя плотность жидкой системы, кг/м^3 ;

μ - средний динамический коэффициент вязкости, Па·с; d - диаметр лопастей мешалки, м.

2) По нормативам и правилам проектирования пищевой и химической аппаратуры в зависимости от технологических условий процесса принимают в среднем соотношение:

$$\frac{D}{d} = (1,5, \dots, 2, \dots, 3), \quad (11)$$

где: D - внутренний диаметр корпуса аппарата, м; d - диаметр лопастей мешалки, м.

Из формулы 11 можно подобрать и рассчитать нужный диаметр лопастей мешалки.

3) Рассчитываем и уточняем модифицированный критерий Рейнольдса (для перемешивания):

$$Re_m = \frac{\rho \cdot n \cdot d^2}{\eta}, \quad (12)$$

где: ρ - плотность экстрагента, кг/м³; n - частота оборотов мешалки, с⁻¹; η - вязкость слабоконцентрированного пектинового раствора, Па·с; d - диаметр лопастей мешалки, м.

4) По графику зависимости вида $Eu_m = f(Re_m)$ модифицированный критерий Эйлера Eu_m (график можно найти в любом учебном пособии ПАПП).

5) Рассчитываем (из формулы 10) рабочую мощность на валу мешалки N в Вт:

$$N = Eu_m \cdot \rho \cdot n^3 \cdot d^5 \quad (13)$$

6) В пусковой период затраты мощности будут выше по причине действия сил инерции. Пусковая мощность $N_{\text{пуск}}$ для плосколопастной мешалки:

$$N_{\text{пуск}} = 1,5 \cdot N \quad (14)$$

7) В соответствии с рассчитанной мощностью выбираем необходимый электропривод и мешалку.

*Примечание: в данной работе для экстрактора, рассчитанного на загрузку 1 кг растительного сырья (выжимок столовой свеклы) выбрали электропривод типа II с одной промежуточной опорой, мотор-редуктором типа МП02 и электродвигателем серий А02 мощностью 75 Вт с частотой вращения вала $n = 16,6 \text{ с}^{-1}$ (исходя из расчетов по вышеописанной методике). Привод состоит из мотор-редуктора, двух муфт, промежуточного вала, стоек, уплотнения вала и перемешивающего устройства.

2.2.2 Расчет ультразвукового излучателя

Звуковое поле УЗ-преобразователя делят на две зоны: ближнюю зону и дальнюю зону (рисунок 18).

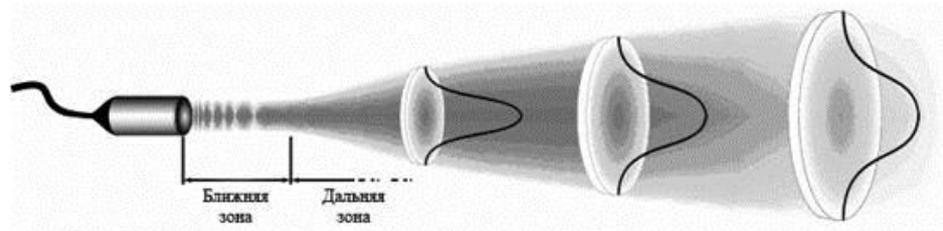


Рисунок 18 - Звуковое поле круглого излучателя

Ближняя зона это район прямо перед преобразователем, где амплитуда эха проходит через серию максимумов и минимумов. Ближняя зона заканчивается на последнем максимуме, который располагается на расстоянии U от преобразователя. Известно, что расположение последнего максимума является естественным фокусом преобразователя. Дальняя зона это район, находящийся за U , где давление звукового поля постепенно уменьшается до нуля.

1) Поскольку в дальней зоне звукового поля давление звука уменьшается растительное сырье должно находиться в ближней зоне звукового поля длина, которой, рассчитывается по формуле:

$$U = \frac{D^2}{4\lambda}, \quad (15)$$

где: U - длина ближней зоны, м; D - диаметр излучателя, м; λ - длина волны, м.

2) Из курса физики, длина волны каждого излучателя определяется:

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (16)$$

где: c - скорость ультразвука, м/с; f - частота, Гц.

3) В твердых веществах для продольных волн скорость звука:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \cdot \sqrt{\frac{1-\mu}{(1+\mu) \cdot (1-2\mu)}}, \quad (17)$$

где: c - скорость звука для продольных волн, м/с; E - модуль упругости, Па; μ - коэффициент Пуассона; ρ - плотность, кг/м³;

Таким образом, необходимо скорректировать расстояние по вертикали от ультразвуковых излучателей (УЗИ) до верхней поверхности сырья.

4) Оптимальная интенсивность ультразвука I_0 подобрана опытным путем

и находится в диапазоне $I_0 = 50-150$ кВт/м². В случае дополнительного контроля величину I_0 можно рассчитать по формуле:

$$I_0 = 0,5\omega \cdot W_0 \cdot \xi_{max} \cdot \xi_{min} = 0,5 \cdot \xi_k^2 \cdot R_n/S, \quad (18)$$

где: ω - круговая частота возбуждения, с⁻¹; W_0 - волновое сопротивление ультразвукового волновода, м⁻¹; ξ_{max} ; ξ_{min} - амплитуда колебательного смещения в пучности и узле колебаний соответственно, м; R_n/S - сопротивление нагрузки, определенное на измерительном звене.

5) Расчетная мощность излучения УЗ излучателя рассчитываем по формуле:

$$P = I_0 \cdot b \cdot \ell, \quad (19)$$

где: I_0 - интенсивность ультразвука, Вт/м²; ℓ - длина сырьевой ситовой камеры, м; b - ширина сырьевой ситовой камеры, м.

*Примечание: в данной работе для экстрактора, рассчитанного на загрузку 1 кг растительного сырья (выжимок столовой свеклы) использовали ультразвуковой излучатель электроакустического типа (*пьезоэлектрический преобразователь*) компании «РЭЛТЕК» - ПМС-6-18. Электрическая мощность $P_{эл.} = 6$ кВт. Акустическая мощность 1,8 - 5 кВт (исходя из расчетов по вышеописанной методике).

2.2.3 Расчет ТЭНов

1) Расчет мощности ТЭН-ов рассчитывается по классической формуле:

$$P = \frac{C_p \cdot M \cdot (t_2 - t_1)}{\tau}, \quad (20)$$

где: C_p - удельная теплоемкость жидкости, Дж/(кг·К); M - масса нагреваемой воды (экстрагента) в кг; t_1 , t_2 - начальная и конечная температуры воды, К; τ - проектное время нагрева при первом режиме, с.

2) ТЭН закладываем в подошву днища корпуса на площади прямоугольника. Укладку ТЭНов производим в подошве по размерам $a = 200$ мм, $b = 250$ мм.

Регулировку мощности в диапазоне 0 - 3 - 6 кВт, что соответствует температурным диапазону 15 - 37 - 90 °С осуществляем согласно принципиальной схеме изображенной на рисунке 19.

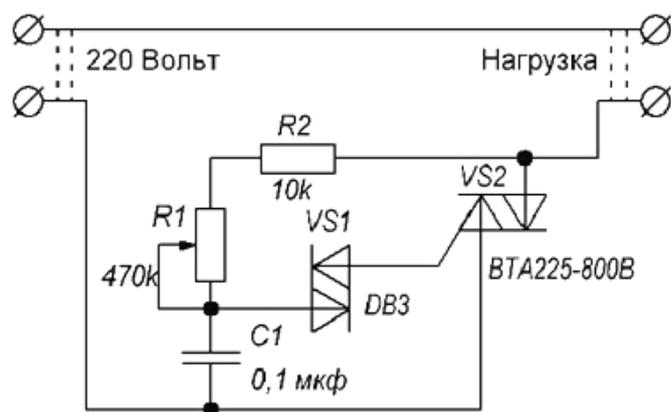


Рисунок 19 - Принципиальная схема установки ТЭНов

*Примечание: в данной работе для экстрактора, рассчитанного на загрузку 1 кг растительного сырья (выжимок столовой свеклы) выбрали по каталогу «Водяные нагреватели РОСНАГРЕВ» по ГОСТ 13268-88 выбрали ТЭНы - ТЭНБ-6 мощностью $P = 6$ кВт (исходя из расчетов по вышеописанной методике). Материал - нерж. сталь. ТЭН в блоке- 3 шт. Полная длина 450 мм.

2.3 Выводы по второму разделу

Разработана конструкция экстрактора растительного сырья позволяющая проводить ферментативную экстракцию пектина из растительного сырья в интенсивном режиме за счет использования УЗ воздействия и активного перемешивания экстрагента.

Исходя из массы растительного сырья и объема экстрагента, приведены расчетные зависимости для определения габаритных размеров экстрактора. Представлено обоснование методики расчета геометрических характеристик и аппаратного оснащения экстрактора растительного сырья.

Методика позволяет рассчитать объем ситового отдела для загрузки растительного сырья, необходимый объем ванны для экстрагента, расположение ключевого аппаратного оснащения, а также другие необходимые геометрические характеристики экстрактора.

Также представлены методы расчета мощности перемешивающего устройства, ультразвукового излучателя и трубчатых электронагревателей.

3 МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБОСНОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭКСТРАКТОРА ДЛЯ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

В теоретических и экспериментальных исследованиях использованы классические методики и уравнения, приведенные в учебных пособиях по предметам «ПАПП» и «ПАХТ», правилами конструкторского проектирования и данными из норм и правил проектирования пищевой и химической аппаратуры, общепринятые методы математической статистики [104], теории планирования эксперимента [105, 106]. Обработка результатов экспериментальных исследований, а также графические работы осуществлялись на ПЭВМ при помощи прикладных программ [107].

Методика проведения экспериментов заключается в обосновании выбора исследуемых параметров, технических средств измерения, измерительных приборов и параметров исследуемого процесса. Экспериментальные исследования проводились на базе КазНИИППП в рамках ПЦФ МСХ РК. Экспериментальный образец установки изготовлен и прошел производственные испытания в условиях ТОО «Тургень Эко-Продукт».

3.1 Методика проведения ферментативной экстракции пектина из растительного сырья

Экстракцию пектина проводили согласно запатентованному сотрудниками КазНИИППП способу - патент Республики Казахстан №29264 [9]. Согласно данному способу экстракцию пектина проводят в водной среде из расчета 1:13 - на $100 \cdot 10^{-3}$ кг высушенных выжимок столовой свеклы 1300 мл воды. Размер частиц растительного сырья - $1-1,5 \cdot 10^{-3}$ м. Температура среды при набухании растительного сырья - 56°C в течение 15-18 часов, температура среды при ферментативной экстракции - 37°C в течение 5 часов при $\text{pH} = 7,2 \pm 0,1$, количество вводимого полиферментного комплекса в ориентире на пектинолитический фермент пектиназу - 20 000 ед. активности, в данном случае использовался полиферментативный комплекс компании «Bio JSC», Бельгия - с активностью компонентных ферментов (ед/г): пектиназы-2000, целлюлазы - 350, т.е. 10% от массы взятого сухого растительного сырья.

В качестве растительного сырья для получения пектинсодержащего экстракта выбран районированный сорт столовой свеклы - «Бордо» на стадии технической спелости. Предварительно корнеплоды переработали на сок, а из выжимок получали пектинсодержащий экстракт.

Содержание пектина определялось титриметрическим методом согласно ГОСТ 29059-91.

3.2 Экспериментальное обоснование рациональных параметров аппаратного оснащения экстрактора

Влияние активного перемешивания экстрагента на кинетику извлечения пектина из столовой свеклы. Для активного перемешивания экстрагента использовалась лопастная мешалка пропеллерного типа с тремя лопастями, в серии опытов частоту вращения выбранной мешалки меняли от 10 с^{-1} до

16,6 с⁻¹. Более высокая частота вращения приводит к высокому пенообразованию среды, в связи с этим выбран данный диапазон. Контрольное испытание проводили стандартным способом - без использования активного перемешивания экстрагента.

На рисунке 20 приведены графики влияния частоты вращения выбранной мешалки на кинетику извлечения пектина из столовой свеклы, построенные на основе полученных экспериментальных данных, при различных значениях числа оборотов n .

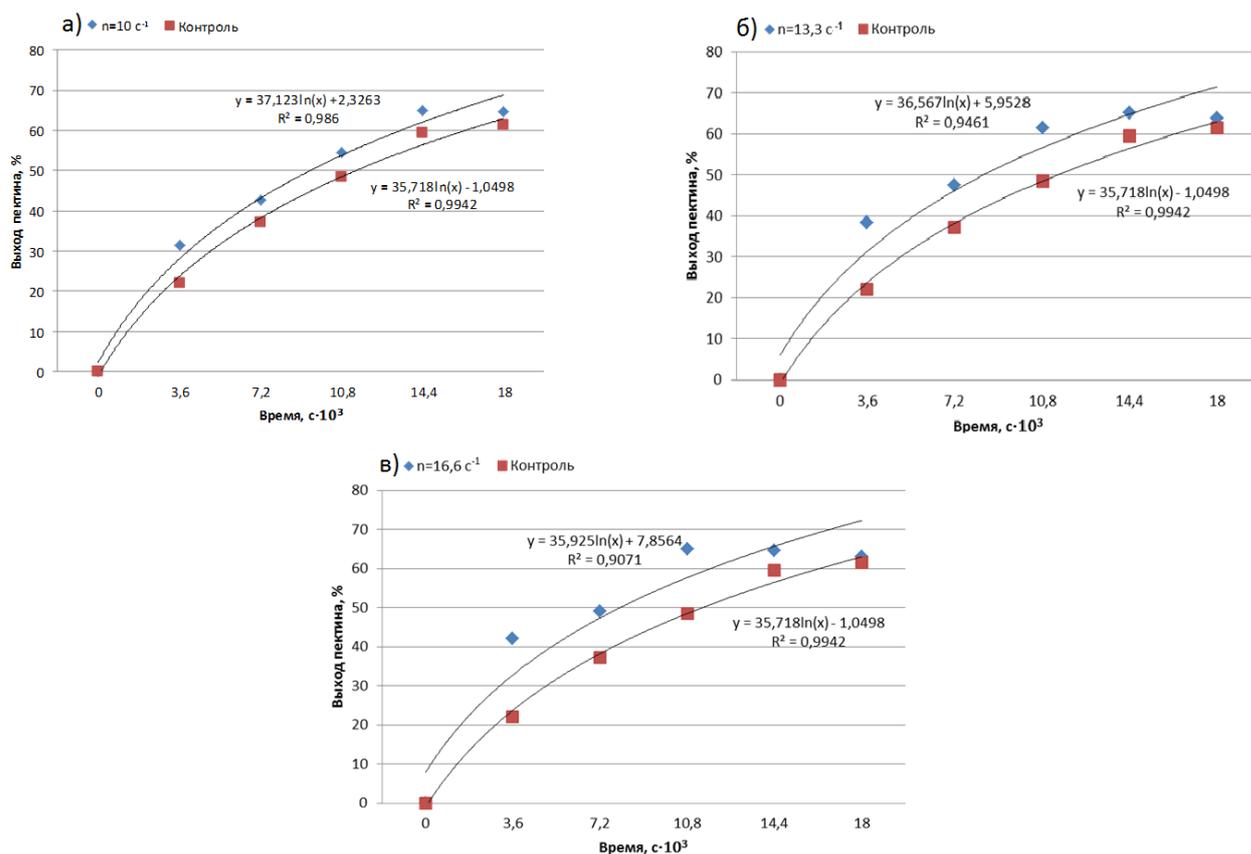


Рисунок 20 - Влияние частоты вращения выбранной мешалки на кинетику извлечения пектина из столовой свеклы при различной частоте вращения мешалки

Как видно из результатов исследований приведенных на графиках рисунка 20 при частоте вращения выбранной мешалки $n = 16,6 \text{ с}^{-1}$ (график в) выход пектина дошел до уровня контрольного образца за 3 часа, когда как в контрольном испытании (без использования активного перемешивания) данный показатель достигался в течение 5 часов ферментации. На графиках а и б видно, что при частоте вращения $n = 10 \text{ с}^{-1}$ и $13,3 \text{ с}^{-1}$, выход пектина дошел до уровня контрольного образца за 4 часа и более.

Исходя из вышесказанного, активное перемешивание экстрагента при ферментативной экстракции пектина значительно увеличивает скорость его выхода. Проведенный эксперимент, наглядно указывает на эффективность использования лопастной мешалкой пропеллерного типа при ферментативной экстракции пектина.

Влияние УЗ на кинетику извлечения пектина из столовой свеклы. Обработку ультразвуком производили при низких частотах (20-30 кГц), как отмечалось ранее в литературных источниках, для экстракции ЦК из растительного сырья использование УЗ при низких частотах является оптимальным для эффективного экстрагирования. Для выявления оптимального режима интенсивности УЗ, провели исследования влияния ультразвука (с различной интенсивностью обработки) на выход пектина из выжимок столовой свеклы, исследование проводилось трехкратно.

Направление ультразвуковых волн производилось прямо на сырье, которое находилось в ближней зоне волн излучателей, поскольку в данной зоне возникает максимальный эффект кавитации.

Контрольное испытание проводили стандартным способом - без использования ультразвука.

Интенсивность озвучивания выбрали в диапазоне от 50-150 кВт/м². Более высокая интенсивность вызывает негативный эффект и активному нагреванию экстрагента, а более низкую интенсивность не имеет смысла использовать.

На рисунке 21 приведены графики влияния ультразвукового воздействия (при различной интенсивности озвучивания) на кинетику извлечения пектина из столовой свеклы, построенные на основе полученных экспериментальных данных.

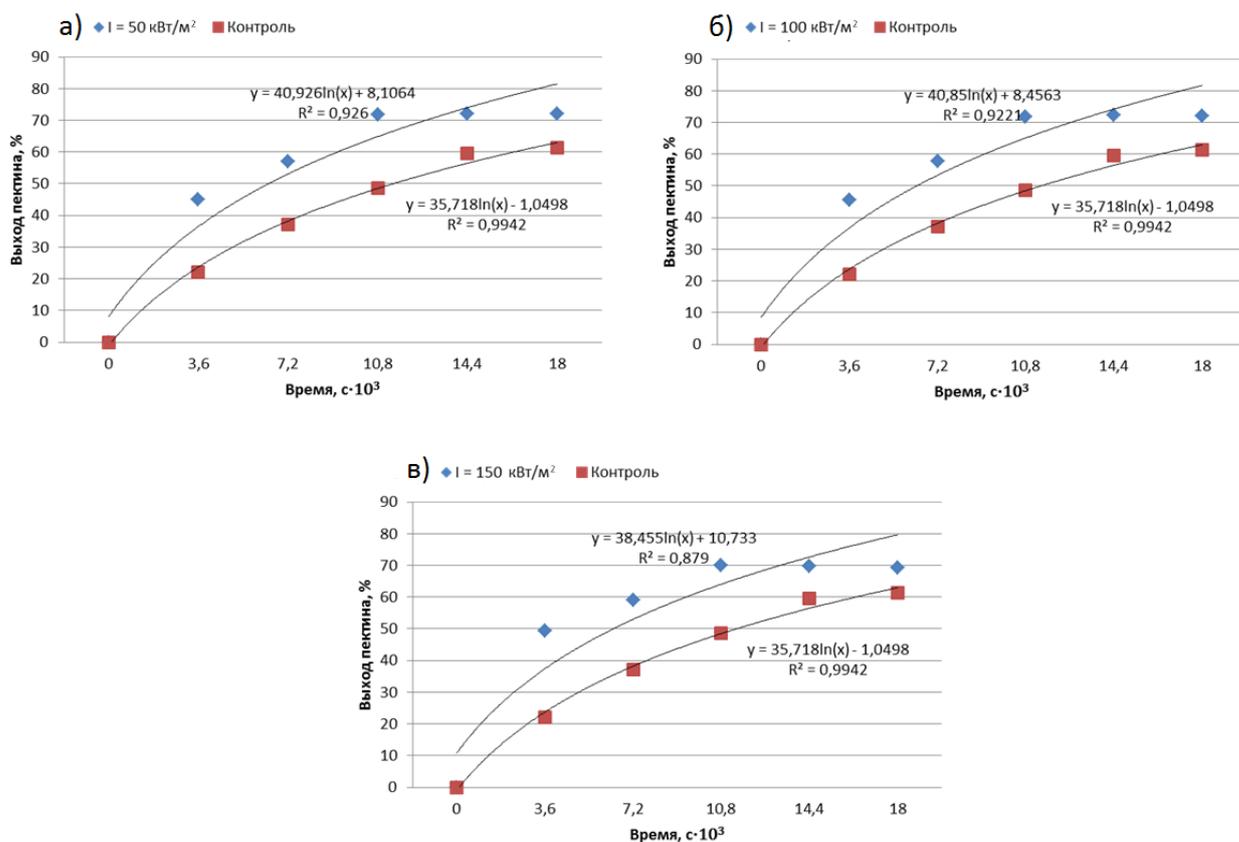


Рисунок 21 - Влияние УЗ (при различной интенсивности озвучивания) на кинетику извлечения пектина из столовой свеклы.

Как видно из графиков на рисунке 21 наиболее оптимальной

интенсивностью обработки ультразвуком при ферментативной экстракции пектина из выжимок столовой свеклы является - 50 кВт/м^2 (график а) при частоте = 25 кГц, при этом, наибольшее содержание пектина в растворе экстрагента составило $71,9 \pm 0,2\%$ от общего его содержания в сырье - $6,89 \cdot 10^{-3}$ кг, после 3 часов ферментации, что на $10,5 \pm 0,2\%$ больше и на 2 часа быстрее контроля. Интенсивность озвучивания выше 50 кВт/м^2 (графики б и в) не привело более интенсивному эффекту экстрагирования и с точки зрения экономии энергии не рассматриваются далее.

Вышеописанные результаты исследований также приведены в акте лабораторных испытаний разработанного экстрактора предназначенного для экстракции пектина из растительного сырья ([приложение Б](#)).

3.3 Определение рациональных параметров режимов работы экстрактора для растительного сырья

В качестве основных факторов влияющих на процесс экстракции пектина из растительной клетки были приняты:

X_1 - частота вращения перемешивающего устройства, с^{-1} ;

X_2 - интенсивность воздействия ультразвуком, кВт/м^2 ;

X_3 - экспозиция (продолжительность процесса), с.

В качестве выходных параметров эксперимента был использован следующий показатель:

Y - выход пектина по отношению к массе содержания его в 100 г сырья.

Для определения оптимальной продолжительности экстракции отбирались пробы каждый час в течение 5 часов, поскольку по ранее запатентованному способу это максимальное время экстракции и основной целью было сократить время экстракции и увеличить выход пектина из растительного сырья.

Все эти факторы совместимы и некоррелируемые между собой пределы изменений исследуемых факторов приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Пределы изменения входных факторов

Условия планирования	Пределы изменения факторов		
	$X_1 \text{ с}^{-1}$	$X_2 \text{ кВт/м}^2$	$X_3, \text{ с} \cdot 10^3$
Верхний уровень	16,6	150	18,0
Нижний уровень	10	50	3,6
Интервал варьирования	3,3	50	3,6

В результате многофакторного статистического анализа впервые решена задача оптимизации диапазона изменения входных параметров режима работы экстрактора предназначенного для ферментативной экстракции с использованием УЗ воздействия на растительное сырье и активного перемешивания экстрагента лопастной мешалкой пропеллерного типа: частота вращения перемешивающего устройства - $3,3 \dots 16,6 \text{ с}^{-1}$; интенсивность воздействия ультразвуком - $50 \dots 150 \text{ кВт/м}^2$; экспозиция (продолжительность процесса) - $3,6 \cdot 10^3 \dots 18,0 \cdot 10^3 \text{ с}$.

3.4 Методика изучения основных функциональных показателей полученного экстракта пектина из растительного сырья

Полученный 1% раствор пектина изучался на антиоксидантную активность и сравнивался с антиоксидантной активностью с лекарственным препаратом-антиоксидантом: эмоксипин - 1% раствор (ФГУП «Московский эндокринный завод», Москва), согласно методу указанного в литературе [110].

Антиоксидантную активность тестируемых веществ изучали с помощью двух методов *in vitro*. В первом методе оценивали восстанавливающую активность исследуемых веществ (метод FRAP). К 0.3 мл инкубационной смеси, содержащей 0.5 мкМ раствор FeCl₃, 0.25 мкМ раствор 2,4,6-трипиридил-S-триазина в 1 мкМ HCl и 75 мкМ ацетатный буфер (pH 3.6), добавляли 0.04 мл 0.1, 0.5 или 1% раствора препаратов. Восстанавливающую активность определяли спектрофотометрическим методом по количеству образовавшегося в течение 60 мин окрашенного комплекса Fe²⁺ с 2,4,6-трипиридил-S-триазином при длине волны 593 нм и выражали в мкМ Fe²⁺ [110, с.331].

Во втором методе об антиоксидантной активности судили по ингибированию Fe²⁺-аскорбатиндуцированного окисления твина 80 (сорбитанмоноолеата) до малонового диальдегида. Для этого к 2.4 мл инкубационной среды, содержащей 0.8% твина 80, 0.08 мМ сернокислого железа и 0.8 мМ аскорбиновой кислоты, добавляли 0.2 мл 0.1, 0.5 или 1% раствора препаратов. Полученную смесь инкубировали в течение 48 ч при температуре 37°C, затем к 2.0 мл смеси приливали 1.0 мл 40% раствора трихлоруксусной кислоты и через 60 мин центрифугировали при 8000 об/мин 15 мин. После этого к 1 мл над осадочной жидкости добавляли 2 мл 0.25% раствора тиобарбитуровой кислоты и кипятили в водяной бане в течение 15 мин. Об антиоксидантной активности препаратов судили по степени ингибирования ими окисления твина 80 до малонового диальдегида и выражали в процентах [110, с.332].

3.5 Выводы по третьему разделу

В разделе представлены методы исследования и обоснование режимов работы экстрактора для растительного сырья при использовании УЗ генератора и механической мешалки.

Определен план проведения эксперимента основных характеристик аппаратного оснащения экстрактора (интенсивность ультразвука и частота перемешивания). Представлены методики проведения процесса ферментативной экстракции пектина из растительного сырья, изучения основных функциональных показателей полученного экстракта пектина. Для проведения экспериментальных исследований использованы поверенные в установленном порядке приборы научно-исследовательской лаборатории «Биотехнологии, качества и пищевой безопасности» КазНИИ перерабатывающей и пищевой промышленности.

Экспериментальным путем обоснованы рациональные режимы работы экстрактора растительного сырья, оснащенного УЗ генератором и лопастной мешалкой. В частности изучено влияние ультразвукового воздействия на

растительное сырье и активного перемешивания экстрагента на кинетику извлечения пектина из столовой свеклы. Проведенные эксперименты показали высокую эффективность применения УЗ генератора и лопастной мешалки при ферментативной экстракции пектина из растительного сырья.

В результате многофакторного статистического анализа впервые решена задача оптимизации диапазона изменения входных параметров режима работы экстрактора предназначенного для ферментативной экстракции с использованием ультразвукового воздействия на растительное сырье и активного перемешивания экстрагента лопастной мешалкой пропеллерного типа (частота вращения перемешивающего устройства - $3,3 \dots 16,6 \text{ с}^{-1}$; интенсивность воздействия ультразвуком - $50 \dots 150 \text{ кВт/м}^2$; экспозиция (продолжительность процесса) - $3,6 \cdot 10^3 \dots 18,0 \cdot 10^3 \text{ с}$).

4 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ФЕРМЕНТАТИВНОЙ ЭКСТРАКЦИИ ПЕКТИНА ПРОТЕКАЮЩЕГО В РАЗРАБОТАННОЙ КОНСТРУКЦИИ ЭКСТРАКТОРА

Для описания процесса экстракции пектина из растительного сырья в предлагаемом оборудовании при комплексном воздействии ультразвука и активного перемешивания была разработана математическая модель.

Для общего представления протекающих процессов при экстракции пектина на рисунке 22 изображена функциональная модель предложенного экстрактора.



Φ_x - фаза исходного растительного сырья; Φ_y - Фаза экстрагента-растворителя;
П - Извлекаемый компонент (пектин).

Рисунок 22 - Функциональная модель экстрактора растительного сырья

Как видно из функциональной модели предложенного экстрактора - экстракция пектина из растительного сырья (выжимок столовой свеклы) будет производиться как воздействием ферментативных препаратов, так и за счет процессов связанных с механическим воздействием: нагревание, перемешивание, ультразвуковая обработка сырья, которые априори должны ускорить процесс выхода пектина из растительного сырья.

Далее более подробно рассмотрим процесс ферментативной экстракции пектина математическую и физико-математическую модель экстрактора.

4.1 Изучение процесса ферментативной экстракции пектина

Экстрагирование относится к группе массообменных процессов. В данной работе имеет место экстракция в системе т-ж. Согласно теории ПАПП движущей силой экстрагирования является разность концентраций вещества между фазами:

$$\Delta C = C_1 - C_2, \quad (21)$$

где: C_1 - средняя концентрация вещества (пектина) в исходном сырье, кг/кг; C_2 - средняя концентрация вещества (пектина) в экстрагенте, кг/кг.

Имеет место неустановившийся (нестационарный процесс), для которого дифференциальное уравнение диффузии имеет вид:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D \cdot \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right), \quad (22)$$

где: $\partial C / \partial \tau$ - нестационарная производная концентрации, кг/с; D - коэффициент диффузии, характеризующий способность вещества менять концентрацию в данной точке в зависимости от распределения концентрации в окрестностях этой точки, м²/с; $\partial^2 C / \partial x^2$, $\partial^2 C / \partial y^2$, $\partial^2 C / \partial z^2$ - градиенты концентраций в объеме (в окрестностях точки), кг/м². Характеризуют накопление или убывание вещества.

На границе раздела фаз т-ж (пектин - вода) массообмен выражается уравнением (из теории ПАПП):

$$D \frac{\partial C}{\partial n} = \beta \cdot (C_{1n} - C_n), \quad (23)$$

где: $\partial C / \partial n$ - изменение концентрации на границе раздела фаз, (кг/кг)²·м/с; β - коэффициент массоотдачи от твердой фазы к жидкой, (кг/кг)·м/с; C_{1n} - концентрация на поверхности раздела фаз, кг/кг; C_n - концентрация в ядре потока второй фазы, кг/кг.

Для выполнения расчетов дифференциальные уравнения (22) и (23) преобразуют и получают:

1) Диффузионный критерий Фурье, характеризующий подобие скорости переноса вещества внутри твердого тела:

$$Fo_D = \frac{D \cdot \tau}{\ell^2} \quad (24)$$

2) Диффузионный критерий Био, характеризующий отношение перепада концентраций в твердом теле к разности концентраций между средой и поверхностью твердого тела:

$$Bi_D = \frac{\beta \cdot \ell}{D}, \quad (25)$$

где: D - средний коэффициент, определенный экспериментально, $\text{м}^2 / \text{с}$; τ - время процесса диффузии, с ; ℓ - определяющий линейный размер при массоотдаче, м ; β - коэффициент массоотдачи, $\text{кг}/\text{кг}\cdot\text{м}/\text{с}$.

3) Установлено, что в процессе экстрагирования пектиновых веществ из свекловичных выжимок, коэффициент диффузии изменяется от $D = 1,4021 \cdot 10^{-11}$ до $29,172 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{с}$ ($t=70^\circ\text{C}$).

При этом, чем ниже температура экстрагирования, тем выше прочность студня, но меньше выход целевого продукта. Увеличение температуры экстрагирования выше 80°C приводит к повышению выхода пектина. Однако студнеобразующая способность, выделенного при таких параметрах продукта снижается, так как при высокой температуре пектины разрушаются

По опытным данным значения коэффициентов диффузии для выжимок столовой свеклы в зависимости от температуры составили:

$t, ^\circ\text{C}$:	20	30	40	60	70	80	90
$D \cdot 10^{11} \text{ м}^2/\text{с}$:	1,402	5,855	14,435	23,456	29,172	34,511	38,234

4) По результатам опытов установлено оптимальное время экстрагирования с учетом ускоряющих факторов: нагрева и ультразвукового воздействия $\tau = 3\text{ч}$.

5) Рассчитываем диффузионный критерий Фурье для основных экспериментальных режимов экстрагирования $t_{p1} = 37^\circ\text{C}$ и $t_{p2} = 90^\circ\text{C}$. Определяющий линейный размер: $\ell = \ell_k + 2 \cdot h_k = 0,2 + 2 \cdot 0,18 = 0,56 \text{ м}$.

При режиме $t_{p1} = 37^\circ\text{C}$:

$$Fo_{D1} = \frac{D_1 \cdot \tau_1}{\ell^2} = \frac{11,682 \cdot 10^{-11} \cdot 3 \cdot 3600}{0,56^2} = 4,02 \cdot 10^{-6}$$

При режиме $t_{p1} = 90^\circ\text{C}$:

$$Fo_{D1} = \frac{D_1 \cdot \tau_1}{\ell^2} = \frac{38,234 \cdot 10^{-11} \cdot 3 \cdot 3600}{0,56} = 13,17 \cdot 10^{-6}$$

6) При экстрагировании в системе т-ж происходит многостадийный процесс:

- диффузия растворителя (экстрагента-воды) в поры твердого тела (малые частицы выжимок свеклы);
- растворение извлекаемого вещества (пектина);
- диффузия пектина внутри насыпной массы к поверхности раздела фаз;
- массопередача от поверхности раздела в ядро потока экстрагента;

– общее диффузионное сопротивление массопереноса складывается из диффузионных сопротивлений внутри твердого тела и в растворителе.

7) Скорость (u) процесса выражается:

$$u = \frac{dM}{F \cdot d\tau} = \beta \cdot (C_{нас} - C_{ср}), \quad (26)$$

где: $C_{нас}$ - концентрация у поверхности твердого тела кг/кг; $C_{ср}$ - концентрация средняя в массе экстрагента кг/кг.

8) Определяющей эффективностью процесса является молекулярная диффузия, скорость которой определяют по уравнению Фика:

$$u = \frac{dM}{F \cdot d\tau} = D \cdot \frac{C_{нас} - C_{ср}}{\delta}, \quad (27)$$

где: δ - толщина пограничного слоя, м.

9) Используем для расчета массопередачи при экстракции уравнение Щукарева, полученное из (6) и (7):

$$\frac{M}{\tau} = \frac{D}{\delta} \cdot F(C_{нас} - C_{ср}) = \beta \cdot F(C_{нас} - C_{ср}), \quad (28)$$

10) Экспериментально установлено:

$$\delta \approx D^{0,333}$$

Имеем при $t_{p1} = 37^\circ\text{C}$:

$$\delta_1 = D_1^{0,333} = (11,682 \cdot 10^{-11})^{0,333} = 4,888 \cdot 10^{-4} \text{ м}$$

при $t_{p2} = 90^\circ\text{C}$:

$$\delta_2 = D_2^{0,333} = (38,234 \cdot 10^{-11})^{0,333} = 7,258 \cdot 10^{-4} \text{ м}$$

11) Рассчитываем коэффициенты массоотдачи (β) для каждого режима:

$$\beta = \frac{D}{\delta} \quad (29)$$

Имеем при $t_{p1} = 37^\circ\text{C}$:

$$\beta_1 = \frac{D_1}{\delta_1} = \frac{11,682 \cdot 10^{-11}}{4,888 \cdot 10^{-4}} = 2,3899 \cdot 10^{-5} \text{ (кг/кг) м/с}$$

при $t_{p2} = 90^\circ\text{C}$:

$$\beta_{opt} = \frac{D_2}{\delta_2} = \frac{38,234 \cdot 10^{-11}}{7,258 \cdot 10^{-4}} = 5,268 \cdot 10^{-5} \text{ (кг/кг) м/с}$$

12) При оптимальном интегральном воздействии перемешивания, тепла и ультразвукового излучения (см. рис. 20, 21) за 3 часа эксперимента наибольшее содержание пектина в растворе экстрагента составило $71,9 \pm 0,2\%$ от общего его содержания в 100 г сырья - 6,89 г.

Таким образом масса пектина ($m_{пек}$), перешедшая в экстрагент со 100 г сырья составила:

$$m_{пек} = 0,719 \cdot 6,89 = 4,954 \text{ г} \approx 5,0 \text{ г}$$

Полная масса пектина ($M_{пек}$), перешедшая в раствор с 1 кг сырья определится:

$$M_{пек} = 10 m_{пек} = 50 \text{ г}$$

13) Средняя массовая концентрация раствора (C_k) на выходе:

$$C_k = \frac{M_{пек}}{M_{эк} + M_{пек}} = \frac{50}{13050} = 0,00383 = 0,383\%$$

14) Требуемую площадь массообмена (F) определим из уравнения массоотдачи на границе раздела фаз ($\Delta C_{гр}$ - средняя разность массовых концентраций):

$$F = \frac{M}{\beta_{opt} \cdot \Delta C_{gp} \cdot \tau} \quad (30)$$

15) Для оптимального режима при $t_{p2} = 90^\circ\text{C}$ и $\beta_{opt} = 5,268 \cdot 10^{-5}$

$$F = \frac{50 \cdot 10^{-3}}{5,268 \cdot 10^{-5} \cdot 3 \cdot 3600 \cdot 0,4} = 0,219 \text{ м}^2$$

16) Вычисляем имеющуюся площадь поверхности массопередачи F_ϕ :

$$\begin{aligned} F_\phi &= \ell \cdot b + 2\ell \cdot h_k + 2b \cdot h_k = 0,2 \cdot 0,2 + 2 \cdot 0,2 \cdot 0,18 + 2 \cdot 0,2 \cdot 0,18 = \\ &= 0,04 + 0,072 + 0,072 = 0,184 \text{ м}^2 = 0,2 \text{ м}^2 \end{aligned}$$

17) Сравнивая F с F_{ϕ} делаем вывод, что имеющаяся площадь практически соответствует определенной по уравнению массопередачи. Таким образом оптимальный режим экстрагирования будет соответствовать $F = 0,2 \text{ м}^2$

18) Рассчитываем диффузионный критерий Нуссельта по второй фазе:

$$Nu_D = 0,8 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr_D^{0,33}, \quad (31)$$

где: $Re = 2500$; Pr_D - диффузионный критерий Прандтля.

$$Pr_D = \frac{\nu}{D} \quad (32)$$

где: ν - средний кинематический коэффициент вязкости экстрагента в процессе; $\nu = 0,5 \cdot 10^{-6} \cdot (1+36) = 18,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; D - средний коэффициент диффузии, при оптимальном режиме:

$$\tau = 3 \text{ ч и } t_{p2} = 90 \text{ }^{\circ}\text{C}. D = 38,324 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{с}.$$

$$Pr_D = \frac{18,5 \cdot 10^{-6}}{38,324 \cdot 10^{-11}} = 4,839 \cdot 10^4$$

19) Решаем критериальное уравнение Нуссельта:

$$Nu_D = 0,08 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr_D^{0,33} = 0,8 \cdot 2500^{0,5} \cdot (4,839 \cdot 10^4)^{0,33} = 0,08 \cdot 50 \cdot 36,31 = 145$$

20) Зная значение критерия Нуссельта, рассчитываем коэффициент массоотдачи по второй фазе β_2 :

$$Nu_D = \frac{\beta_2 \cdot d}{D}, \text{ откуда:}$$

$$\beta_2 = \frac{Nu_D \cdot D}{d} = \frac{145 \cdot 38,324 \cdot 10^{-11}}{2 \cdot 10^{-3}} = 2,778 \cdot 10^{-5}$$

21) Определяем средний коэффициент массопередачи K_M , характеризующий интенсивность процесса, $\text{кг} / \text{м}^2 \cdot \text{с}$.

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\beta_1} + \frac{n}{\beta_2}}, \quad (33)$$

где: n - коэффициент распределения концентрации вещества первой фазы в пограничном слое по отношению к концентрации в ядре второй фазы.

$$n \approx 1,75$$

$$K = \frac{1}{\frac{1}{5,268 \cdot 10^{-5}} + \frac{1,75}{2,778 \cdot 10^{-5}}} = \frac{1}{18983 + 62995} = 1,22 \cdot 10^{-5} (\text{кг/кг}) \cdot \text{м/с}$$

22) Рассчитываем площадь массопередачи по значению K_m

$$F = \frac{50 \cdot 10^{-3}}{1,22 \cdot 10^{-5} \cdot 3 \cdot 3600 \cdot 1,65} = 0,229 \text{ м}^2$$

За основу принимаем расчет площади F через коэффициент массоотдачи $\beta_{\text{опт}}$.

В ультразвуковом поле наряду с крупномасштабными акустическими течениями у границ раздела фаз возникают мелкомасштабные вихревые потоки, характеризующиеся значительными градиентами скоростей, диссипацией энергии и локальным нагревом жидкости. Эти факторы ускоряют диффузию макромолекул в результате турбулентной диффузии и снижения вязкости раствора.

Увеличение скорости экстракции объясняется изменением диффузионного сопротивления пограничного слоя, вязкость которого зависит от растворимости экстрагируемых макромолекул и их межмолекулярного взаимодействия.

Совокупность воздействия перемешивания экстрагента, его нагрева и ультразвукового воздействия является решающим фактором существенного ускорения процесса.

Для физико-математического описания данного интегрального воздействия получим критериальные уравнения.

4.2 Физико-математическая модель процесса ферментативной экстракции пектина

Экстрагирование в системе т-ж, представляет собой массопередачу многостадийного типа. Кроме массоотдачи от поверхности твердой фазы в поток жидкости вещество перемещается внутри твердого тела, которое осуществляется внутренней диффузией (массопроводностью). С достаточной точностью уравнение массопроводности, аналогично закону молекулярной диффузии (закону Фика):

$$dM = -D_m \cdot \frac{\partial C}{\partial y} \cdot dF \cdot d\tau, \quad (34)$$

где: dM - элементарная масса вещества, переместившегося внутри твердой фазы за счет массопроводности, кг; D_m - коэффициент диффузии (коэффициент

массопроводности), $\text{м}^2/\text{с}$; $\partial C / \partial y$ - градиент концентраций в направлении перемещения вещества, $\text{кг}/\text{м}^4$; dF - элементарная площадка, нормальная к потоку вещества, м^2 ; $d\tau$ - элементарное время переноса, с .

В полном объеме вещества процесс его переноса описывается дифференциальными уравнением массопроводности:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D_m \cdot \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right), \quad (35)$$

где: $\partial C / \partial \tau$ - нестационарная производная концентрации; $\partial^2 C / \partial x^2$, $\partial^2 C / \partial y^2$, $\partial^2 C / \partial z^2$ - градиенты концентраций в объеме (в окрестностях точки) - характеризуют накопление или убывание вещества.

Дифференциальное уравнение массоотдачи на границе фаз раздела:

$$-D_m \cdot \frac{\partial C}{\partial y} = \beta \cdot \Delta C, \quad (36)$$

где: β - коэффициент массоотдачи, $\text{м}/\text{с}$; ΔC - средняя разность концентраций вещества на границе раздела фаз, $\text{кг}/\text{кг}$.

Таким образом, скорость массопередачи определяется как массоотдачей, так и массопроводностью. Возможны три случая влияния этих процессов на массоперенос:

- скорость массоотдачи значительно превосходит скорость массопроводности. В этом случае массопередача определяется массопроводностью (D_m);

- скорость массопроводности значительно превосходит скорость массоотдачи. В этом случае определяющим процессом является массоотдача и массоперенос зависит от коэффициента β ;

- если массоотдача и массопроводность соизмеримы, то процесс переноса массы определяется как коэффициентом D_m , так и коэффициентом β .

4.3 Математическая модель процесса экстрагирования

Решаем уравнения (35) при следующих граничных условиях:

$$-D_m \cdot \left(\frac{\partial C}{\partial n} \right)_n = k(C_n - C_1), \quad (37)$$

$$\beta^* = \frac{M \cdot m_p}{\rho \cdot W}, \quad (38)$$

где: C_n - концентрация вещества на поверхности твердого тела (системы), $\text{кг}/\text{кг}$; n - расстояние по нормали к поверхности твердой пористой частицы, м ; M -

масса извлекаемого вещества, кг; m_p - объемная доля пор, заполненных жидкостью, при начальном условии $C|_{t=0} = C_0$; W - объем жидкого экстрагента, м³; ρ - средняя плотность экстрагента, кг/м³; β^* - коэффициент пропорциональности или иначе коэффициент интенсивности извлечения (экстрагирования) вещества.

При этом начальные условия: $C|_{t=0} = C_0$

Периодический процесс - замкнутый процесс.

Допущения:

- 1) форма частиц: пластина;
- 2) твердое извлекаемое вещество распределено равномерно по всему объему;
- 3) кинетические коэффициенты постоянны на протяжении всего процесса.

Получаем искомые уравнения кинетики в обобщенном виде для периодического процесса экстракции. Предложенная система дифференциальных уравнений, представляет собой математическую модель периодического процесса экстрагирования в системе твердое тело-жидкость.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial C}{\partial \tau} = D_m \cdot \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\Gamma}{x} \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \right); C = C(x, t) \\ -D_m \cdot \left(\frac{\partial C}{\partial x} \right)_n = k \cdot (C_n - C_1) \\ \beta^* (C_0 - \bar{C}) = C_1 - C_m \\ C(x, 0) = C_0 \\ \left(\frac{\partial C}{\partial x} \right)_{x=0}; \\ C_m = C_n; \beta^* > 0; C_m = C_k; \beta^* < 0 \end{array} \right. \quad (39)$$

Система (39) определяет концентрацию C в твердом пористом теле, как функцию координаты x и времени τ . Однако точно вычислить теоретическое распределение концентрации в пористом теле не представляется возможным ввиду неустойчивости поля концентраций. При крайне малых размерах частиц сложно поставить эксперимент, из которого можно было бы установить действительное поле концентраций. Гораздо проще определить опытным путем среднюю по объему концентрацию \bar{C} в каждый момент времени. Поэтому уравнения кинетики устанавливают среднюю концентрацию частиц как функцию времени.

Путем решения системы дифференциальных уравнений методом преобразования Лапласа получаем уравнения кинетики в виде:

$$\frac{C_0 - \bar{C}}{C_0 - C_m} = \frac{1}{1 + \beta} - \sum_{n=1}^{\infty} A_n e^{-\mu_n^2 \tau} \quad (40)$$

Величины $\sum_{n=1}^{\infty} A_n e^{-\mu_n^2 \tau}$ зависят от формы тела, для пластины:

$$A_n = \left(\frac{\mu_n^2}{Bi} - \beta \right) + \mu_n^2 \left(\frac{1}{Bi} + 1 \right) + \beta \quad (41)$$

Параметр μ_n определяют по характеристическому уравнению:

$$\operatorname{ctg} \mu = \frac{\mu}{Bi} - \frac{\beta}{\mu}$$

По кинетике экстрагирования с учетом (40) устанавливают параметры β , D , Bi .

Время извлечения (τ) вещества из данного слоя сырья определится:

$$\tau = \int_0^{\theta} \frac{d\theta}{(C_s - C_m) - \beta \cdot [1 - y(\theta)]}, \quad (42)$$

где: θ (y) - характеристическая функция интенсивности извлечения вещества.

$$\frac{d\theta}{d\tau} = C_s - C_1, \quad (43)$$

где: C_s - концентрация на поверхности раствора, кг/кг; C_1 - концентрация на поверхности пористого тела, кг/кг.

В реальном процессе экстрагирования физические условия по длине аппарата меняются по следующим причинам:

– изменение температуры, концентрации, структуры твердых частиц приводит к изменению коэффициента диффузии (D);

– существенно изменяется соотношение массовых потоков взаимодействующих сред;

– изменяются размеры и упругость экстрагируемых частиц;

по этим причинам изменяется коэффициент массоотдачи по длине аппарата. Приведенные факторы могут существенно изменить характер экстрагирования. На ряде участков аппарата процесс может характеризоваться не противоточностью, а полным смешением.

Достаточно точное математическое описание процесса экстрагирования на основе уравнения (24) получают, рассматривая процесс не в целом, а по

отдельным интервалам.

Интервалы по длине аппарата (по времени) должны быть достаточно большими по сравнению с размерами экстрагируемых частиц, но в то же настолько малыми, что бы можно было принять физические условия процесса постоянными в пределах интервала, а экстракционную линию на интервале - прямой.

Таким образом, задача сводится к нахождению в конце интервала поля концентраций в равномерно движущемся твердом теле определенной формы и размеров при постоянных физических условиях, линейном характере изменения концентрации в жидкости, окружающей это тело, и известном в начале интервала распределении концентрации в твердом теле.

Практически в процессе экстракции из твердого тела различными растворителями наблюдаются два случая, которые учитывают в материальном балансе:

– ряд компонентов находится в твердом теле в растворенном состоянии, причем при проведении процесса экстракции в качестве растворителя применяют те же вещества в которых растворены экстрагируемые компоненты. В данном случае это вода;

– некоторые компоненты находятся в твердом теле в виде комплексов молекул, сорбируемых на внутренних и внешних стенках клеток. Для их растворения с целью последующей диффузии из твердого тела в раствор необходимо некоторое количество специального органического растворителя.

Материальный баланс для любого сечения аппарата периодического процесса (в нашем случае имеет место первый случай) примет вид:

$$G \cdot dC = L \cdot dc, \quad (44)$$

где: G - масса растворителя, находящегося в твердом теле, кг; L - масса поступившего в аппарат растворителя (экстрагента), кг; dC - бесконечно малое изменение концентрации экстрагируемого вещества в твердом теле, кг/кг; dc - бесконечно малое изменение концентрации экстрагируемого вещества в растворе, кг/кг.

Из формулы 44 получаем:

$$G \cdot (C_n - C_k) = L \cdot (c_k - c_n), \quad (45)$$

где: C_n и C_k - соответственно начальная и конечная массовые концентрации экстрагируемого вещества в твердом теле, кг/кг; c_n и c_k - соответственно начальная и конечная массовые концентрации экстрагируемого вещества в растворе, кг/кг.

Для любого произвольно принятого сечения аппарата с концентрацией фаз (c и C) уравнение материального баланса примет вид:

$$\int_C^{C_H} G dC = \int_c^{c_K} L dc$$

получаем:

$$G \cdot (C_H - C) = L \cdot (c_K - c), \quad (46)$$

где: c ; C текущие переменные концентрации в любой момент времени.

Выражение (26) представляет собой уравнение рабочей линии процесса.

Отображаем график процесса экстрагирования (рисунок 23).

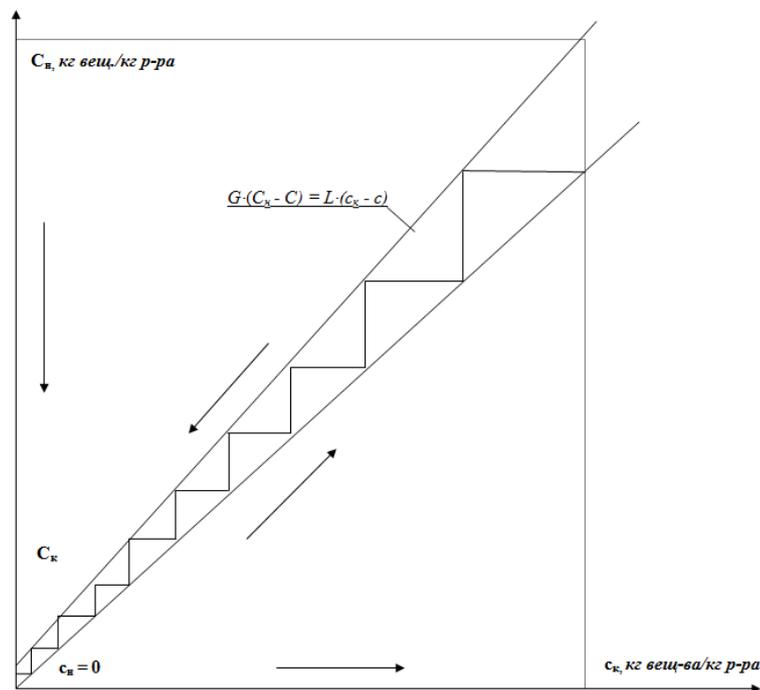


Рисунок 23 - График экстрагирования.
Определение теоретических ступеней концентрации.

Для практических технологических расчетов вышеописанное дифференциальное уравнение массопроводности (25) (математическая модель процесса) вида:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D_m \cdot \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right),$$

преобразуя с применением методов теории подобия, получаем следующие выражения:

1) диффузионный критерий Фурье, характеризующий подобие скорости переноса вещества внутри твердого тела:

$$Fo_D = \frac{D \cdot \tau}{\ell^2}, \quad (47)$$

2) диффузионный критерий Био, характеризующий отношение перепада концентраций в твердом теле к разности концентраций между средой и поверхностью твердого тела:

$$Bi_D = \frac{\beta \cdot \ell}{D} \quad (48)$$

где: D_m - средний коэффициент массопроводности, определенный экспериментально, m^2/c ; τ - время процесса диффузии, с; ℓ - определяющий линейный размер при массоотдаче, м.

В качестве определяемого для случая одномерного перемещения вещества (упрощенная практическая задача) целесообразно использовать величину безразмерной концентрации экстрагируемого вещества в твердой фазе:

$$\frac{C - C_p}{C_n - C_p} = f\left(Bi_D, Fo_D, \frac{y}{\ell}\right) \quad (49)$$

где: C_p - массовая концентрации экстрагируемого вещества в твердой фазе, равновесная с концентрацией в ядре потока, кг/кг; C_n - массовая начальная концентрации экстрагируемого вещества в твердой фазе, кг/кг; C - массовая концентрации в точке с координатой y в момент времени τ , соответствующей определенному Fo_D , кг/кг.

Концентрации вещества в твердой фазе изменяется от C_0 до граничной C .

Для неограниченной пластины аналитическое решение уравнение массопроводности (35) в форме (49) представлена в форме бесконечных рядов.

Для практических расчетов необходимо знать концентрацию в момент времени τ в средней плоскости пластины. С этой целью используем график (можно найти в любом источнике по основам массопередачи), позволяющий по критериям Bi_D и Fo_D определить безразмерные концентрации

$$\frac{C_0 - C_p}{C_n - C_p} = f_1(Bi_D, Fo_D), \quad (50)$$

Эти графики целиком совпадают с графиками безразмерных температур, если символы температур в них заменить символами концентраций и символы Bi и Fo символами Bi_D и Fo_D . Графики позволяют определить необходимое время экстрагирования ($\tau_{экс}$) по заданным пределам изменения концентрации.

$$\tau_{\text{экс}} = \frac{Fo_D \cdot \ell^2}{D_M}, \quad (51)$$

Графиками пользуются в том случае, когда вычислен коэффициент массоотдачи β и вычислен критерий Bi_D .

Установлено, что в процессе экстрагирования пектиновых веществ из свекловичных выжимок, коэффициент диффузии изменяется от $D = 1,4021 \cdot 10^{-11}$ до $38,234 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{с}$ ($t=90 \text{ }^\circ\text{C}$).

При этом, чем ниже температура экстрагирования, тем выше прочность студня, но меньше выход целевого продукта. Увеличение температуры экстрагирования выше $80 \text{ }^\circ\text{C}$ приводит к повышению выхода пектина. Однако студнеобразующая способность, выделенного при таких параметрах продукта несколько снижается.

По опытным данным значения коэффициентов диффузии для выжимок столовой свеклы в зависимости от температуры составили:

t, °C:	20	30	40	60	70	80	90
D · 10 ¹¹ м ² /с:	1,402	5,855	14,435	23,456	29,172	34,511	38,234

Эффективность экстракции вещества из растительного сырья характеризуется массовой скоростью экстракции (v_M) в $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$. Это величина диффузионного потока, переносимого через единицу поверхности в единицу времени:

$$v_M = \frac{dM}{F \cdot d\tau} \quad (52)$$

Периодический процесс экстрагирования в аппарате с мешалкой характеризуется критериальным уравнением вида (для растительного сырья):

$$K_C = 0,68 \cdot 10^{-2} \cdot Fo_D^{-0,45} \cdot Re^{-0,28} \cdot Pr_D^{0,8}, \quad (53)$$

где: K_C - критерий безразмерной концентрации:

$$K_C = \frac{C_\infty - C}{C_\infty - C_H}, \quad (34)$$

где: C_H , C , C_∞ - соответственно концентрации экстрагируемого вещества в твердой фазе при $\tau = 0$; $\tau > 0$; $\tau = \infty$.

Расчет коэффициента массоотдачи (β) от частиц растительного сырья к жидкости в слое Стабников В.Н. рекомендует производить по критериальному уравнению вида:

$$Nu_{д} = 3,8 \cdot 10^{-4} \cdot Re^{1,38} \cdot Pr_{д}^{0,23}, \quad (55)$$

Для растительного сырья более предпочтительно использовать уравнение:

$$Nu_{д} = 0,08 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr_{д}^{0,33}, \quad (56)$$

По данным эксперимента показано, что перемешивание, нагрев и ультразвуковое воздействие на среду увеличивает массовый выход пектина. Интенсивность процесса за счет перемешивания учтена величиной Re . Необходимо учесть в уравнении (45) факторы (критерии) действия нагрева и ультразвука.

В данной работе предложен фактор (критерий) теплового воздействия Te .

$$Te = \frac{t_{н}}{t_0}, \quad (57)$$

где: $t_{н}$ и t_0 - соответственно температура нагрева (режимы 37-90°C) и начальной температуры экстрагента (воды) (15°C по ТУ).

Для режима 37°C :

$$Te_1 = \frac{37}{15} = 2,467$$

для режима 90°C :

$$Te_1 = \frac{90}{15} = 6,0$$

Также предложен критерий ультразвукового воздействия Us .

$$Us = \frac{J}{Z}, \quad (58)$$

где: J - интенсивность ультразвука, кг/м²·с; Z - волновое сопротивление, кг/м²·с.

Амплитуда ультразвукового давления:

Для режима 150 кВт/м²:

$$p = \sqrt{2 \cdot I \cdot v \cdot \rho} = \sqrt{2 \cdot 150 \cdot 10^3 \cdot 1715 \cdot 680} = 591490 \text{ Па}$$

Для плоской синусоидальной бегущей волны интенсивность ультразвука J определяется по формуле:

$$J = \frac{p^2}{2\rho \cdot c} = \frac{591490^2}{2 \cdot 680 \cdot 1714} = 150088 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с} \quad (59)$$

где: J - интенсивность ультразвука, $\text{кг/м}^2 \cdot \text{с}$; p - величина амплитуды УЗ-давления, Па; ρ - плотность среды, кг/м^3 ; c - скорость УЗ-сигнала (скорость ультразвука), м/с.

Ультразвуковое волновое сопротивление:

$$Z = \rho \cdot c = 680 \cdot 1715 = 1166200 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$$

Тогда критерий ультразвукового воздействия для режима 150 кВт/м^2 определится:

$$U_s = \frac{150088}{1166200} = 0,129 = 12,9 \cdot 10^{-2}$$

Для режима 50 кВт/м^2 :

$$p = \sqrt{2 \cdot I \cdot v \cdot \rho} = \sqrt{2 \cdot 50 \cdot 10^3 \cdot 1715 \cdot 680} = 341497 \text{ Па}$$

Для плоской синусоидальной бегущей волны интенсивность ультразвука J определяется по формуле:

$$J = \frac{p^2}{2\rho \cdot c} = \frac{341497^2}{2 \cdot 680 \cdot 1714} = 50029 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$$

Ультразвуковое волновое сопротивление:

$$Z = \rho \cdot c = 680 \cdot 1715 = 1166200 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$$

Тогда критерий ультразвукового воздействия для режима 50 кВт/м^2 определится:

$$U_s = \frac{50029}{1166200} = 0,0429 = 4,29 \cdot 10^{-2}$$

Согласно теории подобия получаем критериальное уравнение вида (с учетом всех вышеуказанных факторов интенсификации):

$$Nu_D = 0,08 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr_D^{0,33} \cdot Te^m \cdot Us^n$$

По результатам обработки кривых на графиках (рис. 20, 21) получим значения степенных показателей $m = 0,21$; $n = 0,01$.

В данной работе предложено критериальное уравнение вида:

$$Nu_D = 0,08 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr_D^{0,33} \cdot Te^{0,21} \cdot Us^{0,01} \quad (60)$$

Уравнение (60) характеризует интенсивность экстрагирования (интенсивность массоотдачи в системе Т-Ж). Рассчитав правую часть, определяем тем самым величину критерия Нуссельта (Nu_D). Зная Nu_D , определяем коэффициент массоотдачи β . Затем рассчитываем по уравнению массоотдачи переданное количество вещества (пектина) в экстрагент.

Для максимально интенсивного режима:

$$Nu_D = 206,77; \beta = 3,961 \cdot 10^{-5} \text{ кг/м}^2\text{с};$$

$$F = 0,2 \text{ м}^2 \text{ (с учетом КПД сетки } \eta = 0,8 \text{)}.$$

4.4 Оптимизация параметров процесса ферментативной экстракции пектина на разработанной конструкции экстрактора

Для оптимизации параметров процесса экстракции пектина из растительного сырья на примере выжимок столовой свеклы провели многофакторный эксперимент. Планирование и результаты экспериментов приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Матрица планирования условий проведения опытов и результаты

№ опыта	Интенсивность перемешивания экстрагента, X_1		Интенсивность $УЗ$, X_2		Продолжительность экстракции, X_3		Выход, %, от общ. массы				S_n^2
	Код.	Об/мин	Код.	кВт/м ²	Код.	ч	y_1	y_2	y_3	\bar{y}	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	0	0	0	0	1	18,0	65,0	65,1	64,9	65,0	0,01
1	0	10	1	150	1	3,6	49,4	49,5	49,1	49,3	0,11
2	1	10	1	150	1	10,8	74,1	74,8	74,5	74,5	0,25
3	1	10	1	150	1	18	72,5	72,3	72,2	72,3	0,21
4	1	10	0	150	1	10,8	54,3	54,7	54,4	54,5	0,27
5	1	10	0	150	1	18,0	64,3	64,7	64,8	64,6	0,28
6	0	16,6	1	50	1	3,6	45	44,9	45,2	45,0	0,13
7	1	16,6	1	50	1	10,8	78,7	78,5	78,8	78,7	0,11
8	1	16,6	1	50	1	18,0	76,4	76,3	76,2	76,3	0,28
9	1	16,6	0	50	1	10,8	64,6	65,2	65,3	65,0	0,11
10	0	16,6	1	50	1	18,0	62,5	62,9	62,9	62,8	0,02
11	0	13,3	1	100	1	3,6	45,6	45,3	45,8	45,6	0,43
12	1	13,3	1	100	1	10,8	75,8	75,4	75,5	75,6	0,45
13	1	13,3	1	100	1	18,0	73,2	73,5	73,3	73,3	0,21
14	1	13,3	0	100	1	10,8	61,2	61,8	61,5	61,5	0,01
15	1	13,3	0	100	1	18,0	63,7	64,1	63,9	63,9	0,01
$S_E = 2,88$											

На основании полученных экспериментальных данных составляем уравнение регрессии. Уравнение регрессии устанавливает зависимость выхода пектина от обозначенных факторных показателей:

$$y = f(X_1, X_2, X_3) \quad (61)$$

Целью многофакторного эксперимента является установление зависимости:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k) \quad (62)$$

Максимальная дисперсия по данным опытов:

$$S_{\max}^2 = S_{12}^2 = 0,45 \quad (63)$$

Критерий Кохрена:

$$G_p = \frac{S_{\max}^2}{\sum_{K=1}^N S_K^2} = \frac{0,45}{2,88} = 0,156 \quad (64)$$

Найдем табличное значение критерия Кохрена. Для этого зададимся уровнем доверительной вероятности $P_G = 0,95$. С учетом этого, а также числа степеней свободы по таблице критических значений критерия Кохрена определяем $G_p = 0,55$.

Видно, что расчетное значение меньше табличного, следовательно, дисперсии опытов однородны, а сами опыты воспроизводимы.

Рассчитываем коэффициенты регрессии модели по формуле:

$$b_i = \frac{1}{N} \cdot \sum_{K=1}^N x_{ik} \cdot \bar{y}_k \quad (65)$$

$$b_0 = \frac{1}{15} \cdot \left(\begin{array}{l} 49,3 + 74,5 + 72,3 + 54,5 + 64,6 + 45,0 + 78,7 + 76,3 + 65,0 + \\ 62,8 + 45,6 + \\ 75,6 + 73,3 + 61,5 + 63,9 \end{array} \right) \\ = 64,193$$

$$b_1 = \frac{1}{15} \cdot \left(\begin{array}{l} -49,3 + 74,5 + 72,3 + 54,5 + 64,6 - 45,0 + 78,7 + 76,3 + 65,0 \\ -62,8 - 45,6 + \\ 75,6 + 73,3 + 61,5 + 63,9 \end{array} \right) \\ = 50,68$$

$$b_2 = \frac{1}{15} \cdot \left(\begin{array}{l} 49,3 + 74,5 + 72,3 - 54,5 - 64,6 + 45,0 + 78,7 + 76,3 - 65,0 + \\ 62,8 + 45,6 + \\ 75,6 + 73,3 - 61,5 - 63,9 \end{array} \right)$$

$$= 43,567$$

$$b_3 = \frac{1}{15} \cdot \left(\begin{array}{l} 49,3 + 74,5 + 72,3 + 54,5 + 64,6 + 45,0 + 78,7 + 76,3 + 65,0 + \\ 62,8 + 45,6 + \\ 75,6 + 73,3 + 61,5 + 63,9 \end{array} \right)$$

$$= 64,193$$

Проверяем значимость коэффициентов модели. Вычисляем дисперсию единичного измерения:

$$S_y^2 = \frac{\sum S_n^2}{15} = \frac{2,88}{15} = 0,192 \quad (66)$$

Дисперсия среднего значения функции отклика:

$$S_{\bar{y}}^2 = \frac{\sum S_n^2}{14} = \frac{0,192}{14} = 0,014 \quad (67)$$

Среднеквадратичное отклонение:

$$S_{\bar{y}} = \sqrt{0,014} = 0,374$$

Для проверки на значимость зададимся доверительной вероятностью $P_t = 0,975$ и рассчитаем число степеней свободы $f=4 \cdot (3-1)=8$. На основании этого по таблицам определим критическое значение критерия Стьюдента. $t_p = 2,31$.

Рассчитаем теперь значения критерия Стьюдента для каждого из факторов и сравним с табличным значением:

$$t_{p_0} = \frac{b_0 \sqrt{4}}{S_{\bar{y}}} = \frac{64,193 \cdot 2}{0,374} = 343,3 > 2,31$$

$$t_{p_1} = \frac{b_1 \sqrt{4}}{S_{\bar{y}}} = \frac{50,68 \cdot 2}{0,374} = 271,01 > 2,31$$

$$t_{p_2} = \frac{b_2 \sqrt{4}}{S_{\bar{y}}} = \frac{43,567 \cdot 2}{0,374} = 232,978 > 2,31$$

$$t_{p_3} = \frac{b_3 \sqrt{4}}{S_{\bar{y}}} = \frac{64,1938 \cdot 2}{0,374} = 343,278 > 2,31$$

Видно, что все коэффициенты регрессии модели значимы, поэтому уравнение регрессии в кодовых переменных приобретает следующий вид:

$$Y = 64,193 + 50,68 \cdot X_1 + 43,567 \cdot X_2 + 64,193 \cdot X_3 - 50,68 \cdot X_1^2 + 47,123 \cdot X_1 \cdot X_2 - 57,436 X_1 \cdot X_3 - 43,567 \cdot X_2^2 + 53,88 \cdot X_2 \cdot X_3 - 64,193 \cdot X_3^2 \quad (68)$$

Проверяем модель на адекватность. Вычислим дисперсию адекватности с учетом того, что $f_{ад} = 4 - (2+1) = 1$.

$$S^2_{ад} = \frac{1}{f_{ад}} \cdot \left(\sum_{k=1}^N \bar{y}^2_k - N \sum_{i=0}^n b^2_i \right) = 0,0458 \quad (69)$$

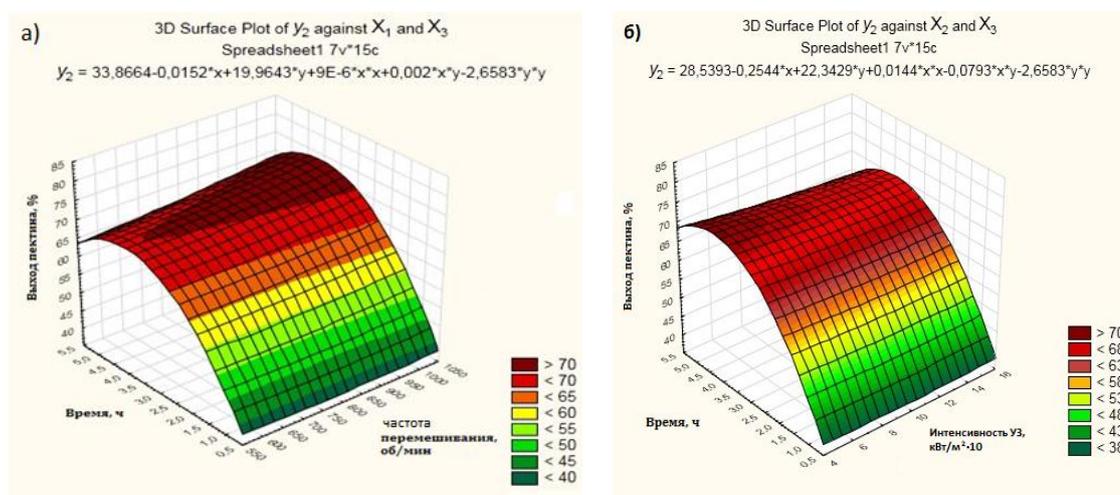
Вычисляем критерий Фишера:

$$F_p = \frac{S^2_{ад}}{S_{\bar{y}}} = \frac{85}{0,014} = 3,22 \quad (70)$$

Для определения табличного значения критерия Фишера зададимся допустимой вероятностью $P_F = 0,95$. С учетом этого, а также числа степеней свободы числителя $f_{ад} = 1$ и знаменателя $f = 8$ по таблице определяем критическое значение критерия Фишера $F_T = 5,32$.

Видно, что расчетное значение критерия Фишера меньше допустимого табличного значения. Это говорит о том, что модель адекватно описывает эксперимент (все его данные).

Интерпретация полученной модели представлена в виде графиков поверхности выхода пектина в зависимости от натуральных значений факторов на рисунке 24.



а - частота перемешивания и продолжительности обработки;
б - Интенсивности УЗ и продолжительности обработки.

Рисунок 24 - Графики поверхности выхода пектина в зависимости от натуральных значений факторов

Три параметра положительно влияют на выход пектина (время экстракции, активное перемешивание и интенсивность УЗ обработки), в особенности УЗ обработка и перемешивание. Однако чрезмерное увеличение интенсивности УЗ обработки и ее продолжительности ведет к разрушению пектина, поэтому необходимо соблюдать технологический режим не превышая нормы.

Перемешивание экстрагента сказывается на увеличении выхода пектина ввиду «вымывания» его из растительного сырья находящегося в сетке. С увеличением активности перемешивания резко возрастает внешняя диффузия (массоотдачи с поверхности частицы растительного сырья в экстрагент).

Максимальный выход пектина при комплексном воздействии всех трех параметров составил 78,7 % в течение трех часов экстрагирования. Таким образом, можно заключить, что использование данного оборудования на 19-21% эффективнее стандартных ферментеров и на 2 часа быстрее.

Полученные результаты позволяют выявить влияние отдельных факторов на выход пектина при ферментативной экстракции и могут быть использованы при проектировании и оптимизации их работы.

4.5 Выводы по четвертому разделу

Проведен анализ процесса ферментативной экстракции пектина. В ультразвуковом поле наряду с крупномасштабными акустическими течениями у границ раздела фаз возникают мелкомасштабные вихревые потоки, характеризующиеся значительными градиентами скоростей, диссипацией энергии и локальным нагревом жидкости. Эти факторы ускоряют диффузию макромолекул в результате турбулентной диффузии и снижения вязкости раствора. Увеличение скорости экстракции объясняется изменением диффузионного сопротивления пограничного слоя, вязкость которого зависит от растворимости экстрагируемых макромолекул и их межмолекулярного взаимодействия.

Обоснована физико-математическая модель для описания процесса экстракции пектина из растительного сырья на предлагаемом оборудовании при комплексном воздействии ультразвука и активного перемешивания предложено критериальное уравнение вида: $Nu_{д} = 0,08Re^{0,5} \cdot Pr_{д}^{0,33} \cdot Te^{0,21} \cdot Us^{0,01}$, которое характеризует интенсивность экстрагирования (интенсивность массоотдачи в системе Т-Ж). Рассчитав правую часть, определяем тем самым величину критерия Нуссельта ($Nu_{д}$). Зная $Nu_{д}$, определяем коэффициент массоотдачи β . Затем рассчитываем по уравнению массоотдачи переданное количество вещества (пектина) в экстрагент.

Получено достоверное и адекватное уравнение регрессии, характеризующее наиболее полно исследуемый процесс: $Y = 64,193 + 50,68 \cdot X_1 + 43,567 \cdot X_2 + 64,193 \cdot X_3 - 50,68 \cdot X_1^2 + 47,123 \cdot X_1 \cdot X_2 - 57,436 \cdot X_1 \cdot X_3 - 43,567 \cdot X_2^2 + 53,88 \cdot X_2 \cdot X_3 - 64,193 \cdot X_3^2$, где Y - выход пектина; X_1 - интенсивность перемешивания; X_2 - интенсивность УЗ; X_3 - продолжительность экстракции, Анализируя данное уравнение, можно отметить, что интенсивность ультразвука в выбранных интервалах варьирования следует уменьшать, продолжительность

экстракции составляет - не менее 3 часов и не более 4 часов. Отрицательные значения коэффициентов двойных взаимодействий говорят, что уменьшение влияния второго параметра (Интенсивности УЗ) приводит к увеличению влияния остальных параметров (интенсивность перемешивания и продолжительность экстракции) и наоборот. Интерпретация полученной модели представлена в виде графиков поверхностей отклика.

Полученные результаты позволяют выявить влияние отдельных факторов на выход пектина при ферментативной экстракции и могут быть использованы при проектировании и оптимизации их работы.

Определены значения режимных параметров экстрактора (интенсивность УЗ и частота перемешивания) для ферментативной экстракции пектина, которые обеспечивают максимум выхода пектина - на 19-21% эффективнее и на 2 часа быстрее стандартному способу с использованием ферментеров.

5 ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ. ИЗУЧЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ПОЛУЧЕННЫХ ОБРАЗЦОВ ЭКСТРАКТА. РАСЧЕТ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

5.1 Производственные испытания

На основании проделанных экспериментов и разработанной методики расчета конструкции экстрактора приведенных в разделе 2 была собрана опытно-промышленная модель с производительностью 3-4 л экстракта в час.

Конструированный для производственных испытаний экстрактор вмещает в себя 1 кг растительного сырья и 15 литров экстрагента. За один период переработки (3 часа) выжимок столовой свеклы на экстракторе получаем в среднем: 10-11 л пектинсодержащего экстракта с концентрацией пектина - 5...6 г/л. Поскольку минимальная суточная норма пектина при профилактическом питании составляет - 1,0 гр., тогда минимальный объем экстракта с концентрацией 5...6 г/л составляет 200 мл.

Исходя из вышеизложенного, при производстве 1 л плодоовощного сока обогащенного пектинсодержащим экстрактом, необходимо смешать 900 мл сока с 100 мл полученного экстракта. Таким образом, 10 л экстракта достаточно для производства 50 л плодоовощных обогащенных соков.

При непрерывной работе экстрактора в течение 1 смены (9 часов), произведено 32 литра пектинсодержащего экстракта. Концентрация пектина в общем объеме экстракта составила - 5,4 г/л.

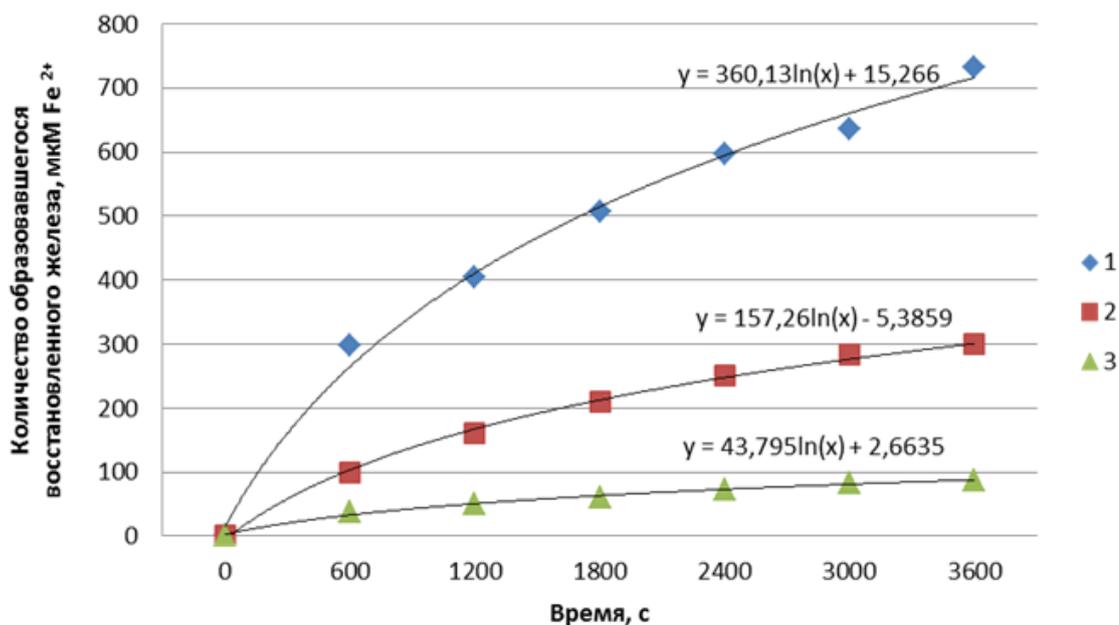
Полученного объема экстракта достаточно для производства 160 л плодоовощного обогащенного сока, а предложенная модель экстрактора показала свою пригодность для малых и средних предприятий по производству натуральных плодоовощных соков. Акт производственных испытаний приведен в [приложении В](#).

Полученные образцы экстракта в дальнейшем изучались по вопросам функциональных свойств и физико-химических показателей и пищевой безопасности результаты приведены далее в разделе 5.2.

5.2 Изучение основных функциональных свойств полученных образцов экстракта пектина столовой свеклы: FRAP метод

В серии опытов сравнивали восстанавливающую активность низкоэтерифицированного пектина из столовой свеклы измеренную по восстановлению трехвалентного железа в условиях *in vitro*, с антиоксидантным средством, лекарственным препаратом - эмоксипином (рисунки 25-26).

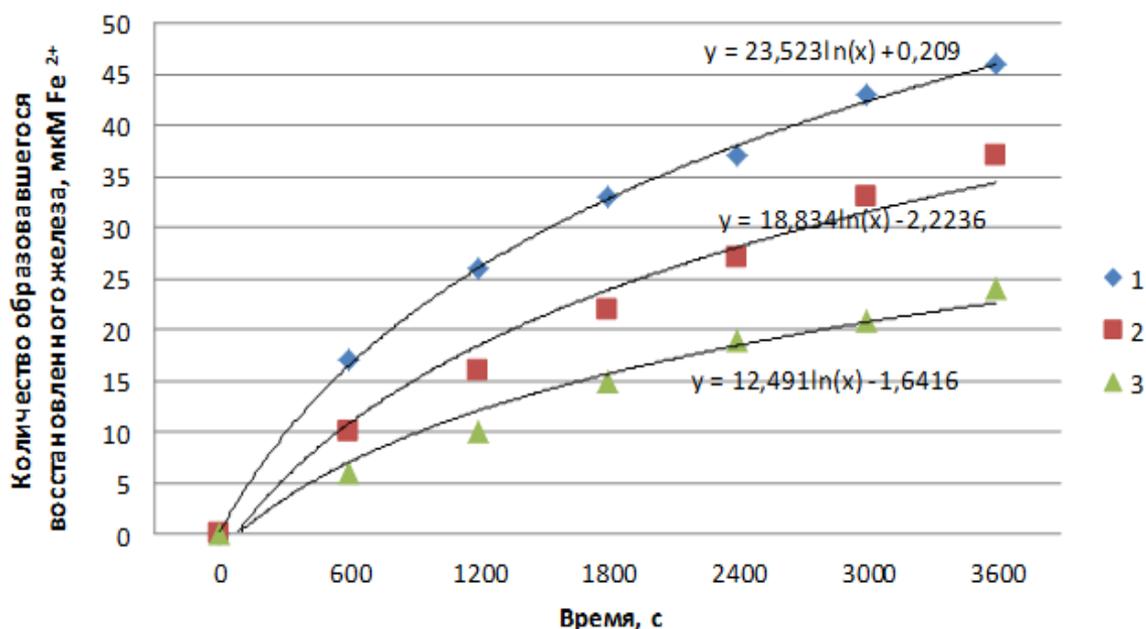
Количество образовавшегося восстановленного железа в реакции с 1% раствором пектина через 60 мин инкубации составляло 740.5 ± 18.8 мкМ Fe^{2+} , с 0.5% раствором - 415.3 ± 10.1 мкМ Fe^{2+} и с 0.1% раствором - 101.2 ± 3.7 мкМ Fe^{2+} (рисунок 25). Эмоксипин обладал более низкой восстановительной способностью по сравнению с пектином [110, с.333].



1 - 1% раствор, 2 - 0,5% раствор, 3 - 0,1% раствор.

Рисунок 25 - Динамика восстановления трехвалентного железа низкоэтерифицированным пектином из столовой свеклы *in vitro*.

Количество образовавшегося восстановленного железа в реакции с 1% раствором эмоксипина через 60 мин инкубации составляло $49,1 \pm 1,0$ мкМ Fe²⁺, с 0,5% раствором - $38,1 \pm 0,9$ мкМ Fe²⁺, с 0,1% раствором - $25,8 \pm 0,6$ мкМ Fe²⁺ (рисунок 26). Увеличение концентрации пектина в 10 раз (от 0,1 до 1%) приводило к увеличению содержания восстановленного железа, полученного через 60 мин после начала инкубации, в среднем в 4 раза, а эмоксипина в среднем в 2 раза [110, с.334].



1 - 1% раствор, 2 - 0,5% раствор, 3 - 0,1% раствор

Рисунок 26 - Динамика восстановления трехвалентного железа эмоксипином *in vitro*.

Таким образом, как видно из результатов, приведенных на рисунках 25 и 26 в условиях *in vitro*, низкоэтерифицированный пектин из столовой свеклы обладает более выраженными восстановительными свойствами, чем лекарственный препарат антиоксидантного действия - Эмоксипин.

Полученные данные позволяют считать, что этот эффект, по крайней мере, частично, обусловлен восстанавливающими свойствами пектинов и непосредственно подавлением механизма образования продуктов перекисного окисления липидов из ненасыщенных жирных кислот. Вместе с тем в антиоксидантный эффект пектинов могут быть вовлечены и другие механизмы, например, связывание ионов тяжелых металлов, в том числе железа.

5.3 Определение качества образцов экстракта пектина столовой свеклы

Полученные образцы экстракта пектина из выжимок столовой свеклы были изучены по основным физико-химическим показателям: пищевая и энергетическая ценности (органолептические показатели, плотность, остаточные количества пестицидов, соли тяжелых металлов: мышьяк (As), свинец (Pb), кадмий (Cd), ртуть (Hg)). Результаты указанных исследований представлены в таблицах 3 и 4 на основании протокола исследований (приложение Г) представленного, аккредитованной при академии питания, лабораторией «Нутритест».

Таблица 3 - Пищевая ценность и основные физико-химические показатели пектинсодержащего экстракта столовой свеклы сортов «Бордо»

Наименование показателей, единицы измерений	Фактическое содержание	Обозначение нормативной документации на методы испытаний
Пищевая ценность, на 100 г: Белок, % Жир, % Влага, %	1,9 0,15 81,47	ГОСТ 26889-86 ГОСТ 8756.21-89 ГОСТ 28561-90
Содержание витаминов, в 100 г: А, мкг Е, мг,% РР, мг,% β-каротин, мкг	0 0,09 0,12 8,0	ГОСТ 7047-55 ГОСТ 30627.3-98 ГОСТ 7047-55 ГОСТ 8756.22-80
Минеральные вещества, на 100 г: Кальций, мг Железо, мг Медь, мг Цинк, мг	49±9,8 1,47±0,29 0,531 0,223	СТ РК ИСО 12081-2010 ГОСТ 26928-86 СТ РК ГОСТ Р 51301-2005 СТ РК ГОСТ Р 51301-2005

Помимо исследования физико-химических показателей полученного пектинового экстракта из районированной столовой свеклы сорта «Бордо» были проведены исследования на содержание токсичных элементов, пестицидов, радионуклидов с целью определения степени пищевой безопасности полученного продукта (таблица 4).

Таблица 4 - Показатели безопасности пектинсодержащего экстракта столовой свеклы сорта «Бордо»

Наименование показателей, единицы измерений	Доп-е нормы по НД	Факт-е сод-е, «Бордо»	Обозначение НД на методы испытаний
1	2	3	4
Токсичные элементы, мг/кг, не более: Свинец Кадмий Мышьяк Ртуть	0,5 0,03 0,2 0,02	0,311 Не обн. Не обн. Не обн.	СТ РК ГОСТ Р 51301-2005 СТ РК ГОСТ Р 51301-2005 ГОСТ 26930-86 ГОСТ 26930-86
Пестициды, мг/кг, не более: ГХЦГ (α , β , γ - изомеры) ДДТ и его метаболиты Нитраты, мг/кг	0,1 0,1 1400	0,0024 Не обн. 401	СТ РК 2011-2010 СТ РК 2011-2010 ГОСТ 29270-95
Радионуклиды, Бк/кг, не более: Цезий - 137 Стронций – 90	80 40	5,5 Не обн.	МИ №KZ 07.00.00304-2009 МИ №KZ 07.00.00303-2009
КМАФАиМ, КОЕ/см ³ не более	5x10 ³	1,5x10 ² - 5,5x10 ²	Изучение микробиологических показателей (общая обсемененность) проводили классическими микробиологическими методами исследования по определению количества мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов
БГПК(колиформы), в 1 см ³	Не доп.	Не обн.	
E.coli	-	Не обн.	
Патогенные микроорганизмы, в т.ч. сальмонеллы, в 10см ³	Не доп.	Не обн.	
Дрожжи, КОЕ/см ³ не более	50	<50	
Плесни, КОЕ/см ³ не более	50	<50	
V.cereus, КОЕ/см ³ не более	200	<1,5x10 ²	

Как видно из таблиц 3 и 4 в результате проведенных исследований, натуральной водный экстракт, полученный из выжимки столовой свеклы «Бордо» соответствуют нормам безопасности пищевой продукции и его можно использовать в качестве пищевой добавки.

5.4 Расчет экономической эффективности

Расчеты экономического эффекта были проведены по методике определения экономической эффективности от внедрения новой техники в пищевой промышленности [111]. Исходные данные указаны в таблице 5.

Таблица 5 - Данные, необходимые для расчета экономической эффективности внедрения новой машины

Показатели	Ед. изм.	Условное обозначение	Значение в проектируемом варианте	Значение в исходном варианте
1	2	3	4	5
Производительность установки	кг/ч	Пр	100	-
Режим работы предприятия	смены дни	С Д	2 90	2 90
Суммарная мощность дополнительного оборудования	кВт	Кв	0,9	-
Коэффициент использования оборудования		К _д	0,8	-
Средняя оптовая цена за единицу продукции, сырья (тонна)	тыс. тенге	Цо	30	-
Численность рабочих в смену	чел	Чр	1	-
Социальный налог и социальные отчисления	%	Ос	21	21
Норма амортизационных отчислений	%	Ао	15	15
Норма расходов на содержание и текущий ремонт	%	Но	10	10
Стоимость дополнительного оборудования	тыс. тенге	Зо	1584,3	-
Нормативный коэффициент эффективности		Ен	0,15	0,15
Тариф на электроэнергию	Тенге/квт*час	Цээ	18,4	18,4
Затраты на амортизацию оборудования		ЗАО	0,1	0,1
Заработная плата	Тг/месяц	Зп	80 000	

Годовая производственная мощность вычисляется по формуле:

$$M_{п} = Пр \cdot С \cdot Д \cdot К_{д} \quad (71)$$

$$M_{п} = 115\,200 \text{ кг}$$

Общий доход от продажи экстракта вычисляется по формуле:

$$\text{ОД} = \text{Мп} \cdot 2 \cdot \text{Цо} / 1000 \quad (72)$$

$$\text{ОД} = 6\,912,0 \text{ тыс. тг}$$

Годовой фонд заработной платы после внедрения вычисляется по формуле:

$$\text{ГФЗПв} = \text{МТС} \cdot \text{ССЧ} \cdot 12 \quad (73)$$

$$\text{ГФЗПв} = 1920,0 \text{ тыс. тг}$$

Социальный налог и социальные отчисления после внедрения установки вычисляется по формуле:

$$\text{ОФССв} = \text{ГФЗПв} \cdot 0,21 \quad (74)$$

$$\text{ОФССв} = 403,2 \text{ тыс. тг}$$

Расход электроэнергии на эксплуатацию экстрактора растительного сырья вычисляется по формуле:

$$\text{Рэнв} = \text{Кв} \cdot \text{Кд} \cdot \text{Д} \cdot \text{С} \cdot 8 \quad (75)$$

$$\text{Рэнв} = 1036,8 \text{ кВт}$$

Дополнительные затраты на электроэнергию вычисляется по формуле:

$$\text{ЗЭЭ} = \text{ЦЭЭ} \cdot \text{Рэнв} \quad (76)$$

$$\text{ЗЭЭ} = 19,1 \text{ тыс. тг}$$

Дополнительные амортизационные затраты вычисляется по формуле

$$\text{ЗТР} = \text{ЗАО} \cdot 0,1 \quad (77)$$

$$\text{ЗТР} = 183,5 \text{ тыс. тг}$$

Годовой экономический эффект производства вычисляется по формуле:

$$\text{ПУП} = \text{ОД} - \text{ГФЗПв} - \text{ОФССв} - \text{ЗЭЭ} - \text{ЗТР} \quad (78)$$

$$\text{ПУП} = 4\,386,2 \text{ тыс. тг}$$

Доходность производства вычисляется по формуле:

$$\text{Доходность} = (\text{годовой экономический эффект} / \text{сумму вложений}) \cdot 100\% \quad (79)$$

$$\text{Доходность} = 27,7\%$$

5.5 Выводы по пятому разделу

В разделе приведены результаты производственных испытаний, в условиях ТОО «Тургень Эко-Продукт», опытно-промышленной модели экстрактора собранного на основе разработанной методики расчета на 1 кг растительного сырья и 15 литров экстрагента. При непрерывной работе экстрактора в течение 1 смены (9 часов), произведено 32 литра пектинсодержащего экстракта. Концентрация пектина в общем объеме экстракта составила - 5,4 г/л. Полученного объема экстракта достаточно для производства 160 л плодоовощного обогащенного сока, а предложенная модель экстрактора показала свою пригодность для малых и средних предприятий по производству натуральных плодоовощных соков.

Изучены функциональные свойства полученных на разработанном оборудовании образцов пектинового экстракта. В условиях *in vitro*, низкоэтерифицированный пектин из столовой свеклы обладает более выраженными восстановительными свойствами, чем лекарственный препарат антиоксидантного действия - эмоксипин, что подтвердило возможность использования полученного экстракта пектина как биологически активной добавки к пище.

Проведено изучение основных физико-химических показателей и показателей безопасности полученных на разработанном оборудовании образцов пектинового экстракта. Содержание пестицидов, токсичных элементов и патогенных микроорганизмов не обнаружено, или показатели находятся в пределах допустимой нормы, что подтверждает безопасность полученной продукции.

Проведен расчет экономической эффективности внедрения предлагаемого оборудования. Внедрение оборудования для переработки вторичного сырья позволит увеличить доходы перерабатывающих предприятий на 4 386 222,88 тенге за счет расширения ассортимента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Краткие выводы по результатам диссертационных исследований:

- 1) изучено современное оборудование и способы интенсификации процесса экстракции ЦК из растительного сырья. Сформированы задачи для проведения исследований;
- 2) разработана конструкция экстрактора растительного сырья, защищенная патентом РК №33150;
- 3) разработана методика расчета предложенной конструкции экстрактора, которая включает в себя: расчет геометрических характеристик и аппаратного оснащения экстрактора;
- 4) впервые решена задача оптимизации диапазона изменения входных параметров режима работы экстрактора для ферментативной экстракции пектина из растительного сырья при использовании УЗ генератора и лопастной мешалки пропеллерного типа;
- 5) изучены основные кинетические закономерности процесса ферментативной экстракции пектина из растительного сырья (влияние ультразвукового воздействия, активного перемешивания экстрагента на характер протекания исследуемого процесса) в широком диапазоне изменения режимных параметров работы экстрактора;
- 6) обоснована физико-математическая модель для описания процесса экстракции пектина из растительного сырья на разработанном оборудовании, предложено критериальное уравнение вида: $Nu_d = 0,08Re^{0,5} \cdot Pr_d^{0,33} \cdot Te^{0,21} \cdot Us^{0,01}$, которое характеризует интенсивность экстрагирования (интенсивность массоотдачи в системе т-ж);
- 7) получено достоверное и адекватное уравнение регрессии, характеризующее наиболее полно исследуемый процесс;
- 8) определены значения режимных параметров работы экстрактора для ферментативной экстракции пектина, которые обеспечивают максимум выхода пектина - на 19-21% эффективнее и на 2 часа быстрее стандартному способу с использованием ферментеров;
- 9) собрана опытно-промышленная модель с производительностью 3-4 л экстракта в час и проведены производственные испытания;
- 10) изучены функциональные свойства, а также физико-химические характеристики и показатели безопасности полученных на разработанном оборудовании образцов пектинового экстракта;
- 11) проведен расчет экономической эффективности внедрения предлагаемого оборудования. Внедрение оборудования для переработки вторичного сырья позволит увеличить доходы перерабатывающих предприятий на 4 386 222,88 тенге за счет расширения ассортимента.

Оценка полноты решений поставленных задач. Результаты теоретических исследований, их оценка, разработанная конструкция экстрактора и методика его расчета, выявленные закономерности протекания процессов ферментативной экстракции пектина с использованием ультразвука и перемешивающего устройства, математическая модель описывающая процесс

ферментативной экстракции в разработанном оборудовании полностью соответствуют поставленным в диссертации задачам.

Разработка рекомендаций и исходных данных по конкретному использованию результатов. Разработанная конструкция, методы расчета и рекомендации по проектированию экстрактора растительного сырья предназначенного для интенсивной ферментативной экстракции пектина, а также результаты экспериментального изучения процесса экстракции, могут быть использованы инженерно-техническими работниками промышленных предприятий и научно-исследовательских организаций, а также в учебном процессе для проведения лекционных, практических и лабораторных занятий.

Исходными данными по конкретному использованию результатов являются методики расчета основных характеристик тепло- и массообмена, методик инженерного расчета гидродинамических характеристик, рекомендаций по использованию современных методов интенсификации процесса экстракции БАВ.

Оценка технико-экономической эффективности внедрения. По результатам проведенных исследований разработана конструкция экстрактора, предназначенная для проведения ферментативной экстракции пектина из растительного сырья, которая испытана в условиях ТОО «Тургень Эко-Продукт» и рекомендована к внедрению на малых и средних предприятиях по переработке растительного сырья (плодов и овощей). Расчетный экономический эффект от внедрения устройства составил 4 386 222,88 тенге в год.

Оценка научного уровня выполненной работы в сравнении с лучшими достижениями в данной области. Проведенная технико-экономическая оценка разработанного и исследованного экстрактора предназначенного для проведения ферментативной экстракции пектина из растительного сырья, показывает, что по ряду показателей, таких как энергозатраты, производительность, материалоемкость, эффективность работы предлагаемое устройство превосходит имеющееся оборудование. Предлагаемая конструкция объединяет экстрактор с ферментером и не имеет аналогов среди устройств, предназначенных для ферментативной экстракции пектина из растительного сырья.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Экология и здоровье нации. Сборник 7. 3-е издание, перераб. и доп. - Караганда: Изд-во Карагандинского государственного технического университета. - 2016. - 109 с.
2. Стратегия «Казахстан-2050»: новый политический курс состоявшегося государства. Послание Президента Республики Казахстан - Лидера Нации Н.А. Назарбаева народу Казахстана, г. Астана, 14 декабря 2012 года. <http://strategy2050.kz>.
3. Баимбетов Н.С., Идирисова Б.Ш. Проблемы экологической безопасности Республики Казахстан//Вестник КазНУ. - 2012. - <https://article.kz.com/article/9573>
4. Бокова Т.И. Закономерности детоксикации антропогенных загрязнителей (тяжелых металлов) в системе почва - растение - животное - продукт питания человека: автореф. ... док. техн. наук: 03.00.16. - Новосибирск, 2005.-34 с.
5. Побегай Т. В. Пищевые волокна и качество готовой продукции // Пищевая промышленность. - 2003. - № 3.- С. 87-89.
6. Велямов Ш.М. Повышение эффективности экстрагирования при получении пектинсодержащего экстракта из сухих выжимок столовой свеклы используя полифункциональный электро-механический экстрактор и изучение его физико-химических и безопасных показателей // Сборник материалов международной научно-практической конференции «Инновационные подходы и технологии для повышения эффективности производства в условиях глобальной конкуренции». - Государственный университет им. Шакарима. - 2016. - С.359-362.
7. Велямов Ш.М., Джингилбаев С.С. Увеличение производительности и эффективности экстрактора растительного сырья для получения пектинсодержащего экстракта столовой свеклы // Материалы республиканской научно-практической конференции «Наука. Образование. Молодежь». - Алматинский технологический университет. - 2016. -С.190-192.
8. Велямов Ш.М., Джингилбаев С.С., Актерян С.Г. Совершенствование процесса переработки растительного сырья с целью извлечение пектина на экстракторе // Новости науки Казахстана. - 2018. - №1 (135) - С.117-134
9. Инновационный патент Республика Казахстан №29264, Способ получения пектинсодержащего экстракта выжимок столовой свеклы районированной в Казахстане для пищевых целей / Велямов М.Т., Дудикова Г.Н., Велямов Ш.М. и др.; заявитель и патентообладатель КазНИИ Перерабатывающей и пищевой промышленности. заявл. 31.1.2014; опубл. 20.11.2014.
10. Велямов Ш.М., Джингилбаев С.С. Исследование влияния скорости перемешивания экстрагента на выход пектина при ферментативной экстракции из столовой свеклы на экстракторе // Вестник Алматинского технологического университета. - 2017. - №1(114). - С.62-65.
11. Анализ рынка/ Производство продуктов питания в Казахстане

[Обзор производителей] // KazDataInsaider -
<https://blog.kazdata.kz/companies/analiz-rynka-proizvodstvo-produktov-pitaniya-v-kazaxstane-obzor-proizvoditelej.html/>.

12. Велямов Ш.М., Джингилбаев С.С. Изучение влияния ультразвука и активного перемешивания экстрагента при ферментативной экстракции пектина из столовой свеклы на экстракторе // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. - 2016. - №7 (часть 1)-С.19-22

13. Велямов Ш.М., Джингилбаев С.С. Динамика ферментативной экстракции пектина из выжимок столовой свеклы на экстракторе // Известия национальной академии наук Республики Казахстан. - 2017. - №1 (37). - С.159-164.

14. Патент на изобретение Республика Казахстан №33150, бюл. №38 от 15.10.2018 г., Экстрактор для получения пектинсодержащего экстракта из растительного сырья / Велямов Ш.М, Джингилбаев С.С., Курасова Л.А.; заявитель и патентообладатель КазНИИ Перерабатывающей и пищевой промышленности.

15. Velyamov Sh.M., Jingilbaev S.S., Acterian S.G. Ultrasound-assisted and agitated enzymatic extraction of pectin from red beet (*Beta vulgaris* L. var. *conditiva*) roots // Bulgarian Journal of Agricultural Science. - 2019. - №1 (25). - P.196-202.

16. Velyamov Sh.M. Dzhingilbaev S.S. Mechanization of processes extraction of pectin from beet and study of physicochemical indicators of safest pectin containing extract // Posters of 11th World Congress on Biotechnology and Biotech Industries Meet. - Berlin: J Biotechnical Biomaterial. - 2016. - №6 (3). - P.58.

17. Сокол Н.В., Хатко З.Н., Донченко Л.В., Фирсов Г.Г. Состояние рынка пектина в России и за рубежом // Новые технологии. - 2008. - С.25-27.

18. Донченко Л.В., Сокол Н.В., Красноселова Е.А. Пищевая химия. Гидроколлоиды // Учебное пособие для ВУЗов. - 2018 - 2-е издание, исправленное и дополненное. - С 9-10.

19. Mazz Marry, Maureen C McCann, Frank Kolpak, Alan R White, Nicola J Stacey and Keith Roberts. Extraction of pectic polysaccharides from sugar-beet cell walls // J Sci Food Agric. - 2000. - №80 - P.17-28.

20. Thakur B.R., Singh R.K., Handa A.K., Rao M.A. Chemistry and uses of pectin - a review // Critical Reviews in Food Science & Nutrition - 1997. - № 37 - P.47-73.

21. Колмакова Н. Необычное в привычном: пектин как полезная пищевая добавка// Пищевая промышленность. -2004. -№8.-С. 77-78.

22. Донченко Л.В., Фирсов Г.Г. Технология пектина и пектинопродуктов. - Краснодар: КГАУ, 2006.- С.222.

23. Колесников, В.А. Пищевые свекловичные волокна: производство и использование // Сахар. - 2006. - № 4 - С.58-61.

24. Yapo B. M., Wathelet B., Raquot M. Comparison of alcohol precipitation and membrane filtration effects on sugar beet pulp pectin chemical features and surface properties // Food Hydrocolloids. - 2007. -№21(2).-P.245-255.

25. Бредихина Н.А. Пектины - уникальные природные целители // Пища,

вкус, аромат. - 2001. - № 32. - С. 32.

26. <http://msd.com.ua/tehnologiya-konditerskogo-proizvodstva/pektinovyeveshhestva-rastenij-i-plodov/>

27. Скурихин И.М., Шатерников В.А. Как правильно питаться. -М.: 139 Агропромиздат, 1985. - 239с

28. Письменный В.В., Троицкий Б.Н., Кочеткова и др. Пектин и пектино-профилактика // Пищевая промышленность.- 1998. -№ 2. - С. 46.

29. Зайко Г.М., Тамова М.Ю. Получение очищенного пектина для использования в лечебных и профилактических целях// Известия ВУЗов. Пищевая технология. - 1998. - №1. - С. 13-19.

30. Колеснов А.Ю., Письменный В.В., Троицкий Б.Н. Пектиновые смеси для домашнего приготовления продуктов пищевого и лечебно-профилактического назначения // Пищевая промышленность.- 1998.- № 6. - С. 16-19.

31. Потиевский В.Н., Дроздов В.Н., Антибактериальное действие пектина в эксперименте и клинике. - Омск: ОмГМА, 1997. - №6 - С. 101-103

32. Аймухамедова Г.Б., Алиева Д.Э., Шелухина П.П. Свойства и применение пектиновых сорбентов. - Фрунзе: Илим. - 1984. - 131с.

33. Макаренко Я.Ю. Пектиновые энтеросорбенты в комплексной терапии гастродуоденальных язв: дис... канд. техн. наук: 14.00.05. - Владивосток, Владивостокский государственный медицинский университет.- 2003. -129 с.

34. Состав и свойства: свекла и сок из нее // Zdorov-Today.ru. - <https://zdorov-today.ru/sostav-i-svoystva-svekla-i-sok-iz-nee/>

35. Плащенко Л.П., Плащенко В.Л. Вторичное растительное сырье - биологически активная составляющая для создания продуктов питания нового поколения // Вестник ВГУИТ. - 2012. - №1. - С.100-106.

36. Пектины // Википедия. Свободная энциклопедия. - <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%B5%D0%BA%D1%82%D0%B8%D0%BD%D1%8B>.

37. Пискурев В.А. Динамика накопления пектиновых веществ в корнеплодах свеклы (*Beta vulgaris* L.) в онтогенезе: автореферат ... канд. с/х. наук: 03.01.05 - Орел, 2012. - С.9-10.

38. Сокол Н. Щербакова Е. Технология функциональных продуктов питания // Учебное пособие для СПО. - 2018. - 2-е издание исправленное и дополненное. - С 24.

39. Шишацкий Ю.И., Мельникова Е.И., Плюха С.Ю., Кузьмин Е.В., Иванов С.С., Самойлова М.А. Перспективные типы экстракционных аппаратов для системы «твердое тело - жидкость» // Аспекты теории и анализ конструкций. - 2012. - №2(40). - С.339-349.

40. Аксельруд, Г.А. Экстрагирование (система твердое тело - жидкость) / Г.А. Аксельруд, В.М. Лысянский. - Л. : Химия,1974. - 256 с.

41. Экстракторы // Официальный сайт компании «Агромаш» - <http://www.agro-mash.ru/ekstraktor.html>.

42. Линия (установка) гидродинамической экстракции из растительного

сырья // Официальный сайт компании «Агромаш» - http://www.agromash.ru/new_lin_gidr_ekstr.htm.

43. Экстракционное оборудование Samtech // Фармтех - <http://www.pharmtech.ru/samtech.htm>.

44. Пат. 2063148 МПК7 В01D 11/02 Российская Федерация. Ломачинский В.А., Квасенков О.И., Пенто В.Б., Касьянов Г.И. Устройство для выделения пектина из плодово-ягодных выжимок / заявл. 28.12.93; опубл. 10.07.96, Бюл.№17/2000.

45. Пат. 2127752 МПК7 6 С11В 1/10 Российская Федерация. Квасенков О.И., Ломачинский В.А. Экстрактор для растительного сырья. заявл. 13.10.1997; опубл. 20.03.1999 Бюл. №31/2001.

46. Пат. 2131886 С08В37/0 Российская Федерация. Нариниянц Г.Р. Квасенков О.И. Кузнецова Е.Н. Гореньков Э.С. Линия производства пектина. 6 заявл. 13.10.1997; опубл. 20.06.1999

47. Жматова Г.В., Нефедов А.Н., Гордеев А.С., Килимник А.Б. Методы интенсификации технологических процессов экстрагирования биологически активных веществ из растительного сырья // Вестник ТГТУ. - 2005. - № 3 (Том 11) - С.701-707.

48. Самсонова А.Н., Утешева В.Б.. Технология и оборудование сокового производства // Пищевая промышленность. - 1976. - 275 с.

49. Муравьев, И.А. Технология лекарств // Медицина. - 1971. - 752 с.

50. Пономарев, В.Д. Экстрагирование растительного сырья // Медицина. - 1976. - 204 с.

51. Муравьев, И.А. Пути интенсификации процесса экстрагирования растительного сырья и совершенствование способов его расчета // Материалы конференции по совершенствованию производства лекарств и галеновых препаратов. - Ташкент. - 1969. - С.181.

52. А. с. SU 1286232 А 1 В 01 Д 11/02. Способ экстрагирования из твердого тела / А.А. Долинский, В.Н. Мудриков, А.А. Корчинский (СССР). - № 3936068 / 31-26; Опубл. 8.08.1985, Б. И. № 22.

53. А. с. SU 1263280 А1 В 01 Д 11/02. Способ экстрактивного извлечения целевых компонентов из древесины / С.М. Гребешок, Р.Н. Кирикосян, В.С. Павлов (СССР). - № 3831330 / 28 - 13; Опубл. 13.12.1984, Б. И. № 22.

54. Бутиков В.В. Интенсификация процессов в массообменном оборудовании химических производств наложением электрических полей / В. В. Бутиков // Электронная обработка материалов. - 1983. - № 4. - С.30-32.

55. Жарик Б.Н. О разрушении клеточных оболочек растительной ткани при электроплазмолизе // Электронная обработка материалов. - 1990. - №8 - С.67-67.

56. Ботошан Н.И. Интенсификация процесса экстракции сахара предварительной обработкой свекловичной стружки // Электронная обработка материалов. - 1990. - № 8 - С.67-73.

57. Ботошан Н.И. Явление гистерезиса при электрической обработке биологических сред // Электронная обработка материалов. - 1988. - № 3. - С.70-75.

58. Кардашов, Г.А. Физические методы интенсификации процессов химических технологий // Машиностроение. - 1990. - С.208.
59. Казуб, В.Т. Кинетика и основы аппаратурного оформления процессов электроразрядного экстрагирования биологических активных соединений: автореф. дис. докт. техн. наук. - 2002. - С.28.
60. Гулый, Г.А. Оборудование и технологические процессы с использованием электрогидравлического эффекта // Машиностроение. - 1977. - С.320.
61. Нагульных, К.А. Электрические разряды в воде // Наука. - 1971. - С.190.
62. Яцко, М.А. ЭГ - установка мембранного типа для обработки виноградной мезги // Электронная обработка материалов.-1970.-№ 4.-С.53-56.
63. Димов, Х.Т. Влияние электрогидравлического удара на степень разрушенности структуры сырья: листья прессовки и семян дрока // Формация. - 1979. - № 6. - С.57.
64. Яцко, М.А. Влияние электроимпульсной обработки на водные растворы углеводов / М.А. Яцко // Электронная обработка материалов. - 1975. № 3. - С.59 - 60.
65. Семкин, Б.В. Основы электроимпульсного разрушения материалов // Наука. - 1995. - С.277.
66. Патент РФ № 2066326. 6 С 08 В37/06. Способ получения пектинов, обладающих антибактериальным действием / В.Т. Казуб, Н.Ш. Кайшева, В.А. Компанцев, Ю.Н. Кудимов, Т.Н. Ващенко. -Опубл. 10.09.96. Б.И. № 25.
67. Мартиросян, К.В. Интенсификация процессов извлечения полисахаридов в электроразрядных экстракционных аппаратах: автореф. дис. канд. техн. наук. - 2002. - С.16-26.
68. Голянина, И.П. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / И.П. Голянина. - М.: Советская энциклопедия, 1979. - 400 с.
69. Эльпинер, И.Е. Ультразвук. Физико-химическое и биологическое действие / И.Е. Эльпинер. - М.: Госиздат, 1963. - 420 с.
70. Фридман, В.М. Физико-химическое действие ультразвука и ультразвуковая аппаратура для интенсификации химико-технологических процессов / В.М. Фридман. - М.: НИИХМ, 1965. - 213 с.
71. Аграпат, Б.А. Основы техники и физики ультразвука / Б.А. Аграпат, Н.М. Дубровин, Н.Н. Хавский. - М.: Высш. школа, 1987. - 352 с.
72. Заяс, Ю.Ф. Интенсификация технологических процессов при помощи ультразвука / Ю.Ф. Заяс // Пищевая промышленность. - 1960. - № 3. - С. 21.
73. Немчин, А.Ф. Опыт применения кавитационных аппаратов в сахарной промышленности / А.Ф. Немчин. - М.: Агропромиздат. - 1986. - сер. 23 - вып. 1.
74. Келлер, О.К. Ультразвуковая очистка / О.К. Келлер, Г.С. Кротыш, Г.Д. Лубяницкий. - Л.: Машиностроение, 1977. - 253 с.
75. Немчин, А.Ф. Опыт применения кавитационных аппаратов в сахарной промышленности / А.Ф. Немчин. - М.: Агропромиздат. - 1986. - сер. 23 - вып. 1.

76. Келлер, О.К. Ультразвуковая очистка / О.К. Келлер, Г.С. Кротыш, Г.Д. Лубяницкий. - Л.: Машиностроение, 1977. - 253 с.
77. Гнасюк, Г.Н. Применение ультразвука для повышения сокоотдачи винограда / Г.Н. Гнасюк, М.В. Левина, В.Т. Поновский. - В кн. Применение ультразвука. - М.: ЦНИТИэлектропром, 1960. - С. 141.
78. Гнасюк, Г.Н. Ускорение кристаллизации винного камня при воздействии ультразвука / Г.Н. Гнасюк, И.П. Дульнева, В.Г. Поповский. - В кн. Применение ультразвука. - М.: ЦНИТИэлектропром, 1960 - С. 73.
79. Фиклистов, И.Н. Методы интенсификации процесса экстрагирования / И.Н.Феклистов, Г.А.Аксельруд // Инженерный физический журнал.-1964. - № 1. - С. 45.
80. Молчанов, Г.И. Интенсивная обработка лекарственного растительного сырья / Г.И. Молчанов. - М.: Медицина, 1981. - 206 с.
81. Молчанов, Г.И. Ультразвук в фармации.-М.:Медицина, 1980.-176 с.
82. Аксельруд, Г.А. Экстрагирование системы твердое тело - жидкость / Г.А. Аксельруд, В.М. Лысянский. - Л.: Химия, 1974. - 256 с.
83. Новицкий, Б.Г. Применение акустических колебаний для интенсификации процессов химической технологии / Б.Г.Новицкий. - М.: Машиностроение, 1978. - 56 с.
84. Гершал, Д.А. Ультразвуковая аппаратура / Д.А. Гершал, В.М. Фридман. - М.: Энергия, 1967. - 300 с.
85. Жарова, Е.Я. Применение ультразвука при кристаллизации глюкозы / Е.Я. Жарова. - М.: Агропромиздат, 1974. - 32 с.
86. Karamfilov V.K., Fileman T.W., Evans K.M., Mantoura R.F.C. Determination of Dimethoate and Fenitrothion in Estuarine Samples by C-18 Solid-Phase Extraction and High-Resolution Gas-Chromatography with NitrogenPhosphorus Detection // Anal chim acta. - 1996.-V. 335, Iss. 1-2.-P.51-61.
87. Tikkanen K., Haataja S., Finne J. The Galactosyl-(Alpha-1-4)-Galactose-Binding Adhesin of Streptococcus-Suis - Occurrence in Strains of Different Hemagglutination Activities and Induction of Opsonic Antibodies // Infec immunity. - 1996. - V. 64, Iss. 9. - P.3659-3665.
88. Schneider R.J. Evaluation of an Extraction Method for Triazine Herbicides from Soils for Screening Purposes // Agribiol res. -1995.-V. 48, Iss. 3-4. - P. 193-206.
89. Sawaizumi M., Maruyama Y., Onishi K., Iwahira Y. Endoscopic Extraction of Lipomas Using an Ultrasonic Suction Scalpel // Ann plastic surg. - 1996. - V. 36, Iss. 2. - P. 124-128.
90. Manoli E., Samara C. Polycyclic Aromatic-Hydrocarbons in Waste-Waters and Sewage-Sludge - Extraction and Cleanup for HPLC Analysis with Fluorescence Detection // Chromatographia. - 1996. - V. 43, Iss. 3-4. - P. 135-142.
91. Hartmann R. Polycyclic Aromatic-Hydrocarbons (PAHs) in Forest Soils - Critical-Evaluation of a New Analytical Procedure // Int j environ anal chem. - 1996. - V. 62, Iss. 2. - P. 161-173.
92. Engels W.J., Visser S. Development of Cheese Flavor from Peptides and AminoAcids by Cell-Free-Extracts of Lactococcus-Lactis Subsp Cremoris B78 in a Model System // Neth milk dairy. - 1996. - V. 50, Iss. 1. - P. 3-17.

93. Korolev S., Samko O., Eldarov M., Kalugin A. Site-Specific Endonuclease Bcuai from *Bacillus-Cereus-A* // *Bioorg khim.* - 1996. - V. 22, Iss. 7. - P. 528-531.
94. Mierzwa J., Adeloju S., Dhindsa H. Ultrasound Accelerated Solid-Liquid Extraction for the Determination of Selenium in Biological Samples by Electrothermal Atomization Atomic-Absorption Spectrometry // *Anal sci.* - 1997. - V. 13, Iss. 2. - P. 189-193.
95. А. с. SU 1286232 А1 В 01 D 11/02. Способ экстрагирования из твердого тела / А. А. Долинский, В. Н. Мудриков, Р. Н. Корчинский (СССР). - №3936068/31-26; Опубл. 08.08.1985, Б. И. № 22.
96. Гершал Д.А., Фридман В.М. Ультразвуковая аппаратура.-М.: Энергия, 1967. -300 с.
97. Новицкий Б. Г. Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах. -М.: Химия, 1983. -192 с.
98. Ультразвуковая экстракция полисахаридов льна - <https://works.doklad.ru/view/y96dimut7le/all.html>
99. Бабилов О. И. Ультразвук и его применение в промышленности.-М.: Гос.издат.физико-математ.лит-ры, 1958. - 260 с.
100. Гидравлика и теплотехника // Перемешивание в жидких средах. - <http://firing-hydra.ru/index.php?request=full&id=610>.
101. Лисовская Д.П., Рощина Л.А. и др. Производственные технологии // Учебник. - 2009. - 400 с.
102. Мешалки. Назначение, устройство, принцип действия и область применения. - https://studopedia.ru/8_147007_meshalki-naznachenie-ustroystvo-printsip-deystviya-i-oblast-primeneniya.html
103. Калекин В.С., Михайлец С.Н. Гидравлика и теплотехника // Учебное пособие для ВУЗов. - 2019. - 318 с.
104. Ивченко Г.И., Медведев И.Ю. Введение в математическую статистику: учебник. - М., 2014. - 352 с.
105. Грачев Ю.П., Плаксин Ю.М. Математические методы планирования экспериментов. - М.: ДеЛи. принт, 2005. - 296 с.
106. Гурский Д.А. Вычисления в Mathcad.-М.:Новое знание, 2003.-814с.
107. Боровиков В. Statistica. Искусство анализа данных на компьютере. - Изд. 2-е. - СПб.: Изд-во Питер, 2003. - 688 с.
108. Балдев Радж, В.Раджендран, П.Паланичами. Применения ультразвука.-Москва.:Техносфера, 2006.
109. Гриценко В.В. процессы и аппараты пищевых производств. Учебное пособие для студентов очной и заочной форм обучения направления 151000.62 «Технологические машины и оборудование». Руб-к, 2014.-209 с.
110. Коленченко Е.А., Сони́на Л.Н., Хотимченко Ю.С. Сравнительная оценка антиоксидантной активности низкоэтерифицированного пектина из морской травы *zostera marina* и препаратов-антиоксидантов *in vitro*. // *Russian Journal of Marine Biology*. Т. 31. № 5., 2005.- С. 331-334.
111. ГОСТ Р 53056-2008. Техника сельскохозяйственная. Методы экономической оценки. - Введ. 2008-12-17. - М.: Стандартинформ, 2009.-20 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ



ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ

РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

**ПАТЕНТ
PATENT**

№ 33150

ӨНЕРТАБЫСҚА / НА ИЗОБРЕТЕНИЕ / FOR INVENTION



(21) 2016/1076.1

(22) 21.11.2016

(15) 01.10.2018

(54) Өсімдік шикізатынан құрамында пектині бар экстракт алуға арналған экстрактор
Экстрактор для получения пектинсодержащего экстракта из растительного сырья
Extractor for pectin obtaining extract from plant raw materials

(73) "Қазак өнеркәсіпті қайта өңдеу және азықтық ғылыми зерттеу институты" жауапкершілігі шектеулі серіктестігі (KZ)

Товарищество с ограниченной ответственностью "Казахский научно-исследовательский институт перерабатывающей и пищевой промышленности" (KZ)

«Kazakh research institute of processing and food industry» Limited Liability Partnership (KZ)

(72) Велямов Шухрат Масимжанович (KZ)

Джингилбаев Сеит Сарсенбаевич (KZ)

Курасова Людмила Александровна (KZ)

Velyamov Shukhrat Masimzhanovich (KZ)

Dzhingilbaev Seit Sarsenbaevich (KZ)

Kurasova Lyudmila Aleksandrovna (KZ)



«Ұлттық зияткерлік меншік институты» РМК директоры
Директор РГП «Национальный институт интеллектуальной собственности»
Director of RSE «National institute of intellectual property»



АКТ
испытаний экстрактора для растительного сырья, предназначенного для ферментативной экстракции пектина

Мы, нижеподписавшиеся, PhD докторант Велямов Ш.М., химик-аналитик Курасова Л.А., научный руководитель Джингилбаев С.С., составили настоящий акт испытаний проведенных с целью оптимизации технологического режима разработанной конструкции экстрактора оснащенного ультразвуковым генератором и быстроходной мешалкой лопастного типа, предназначенного для ферментативной экстракции пектина из растительного сырья.

Нами был оптимизирован технологический режим согласно входным параметрам, приведенным в таблице 1.

Таблица 1. - Входные параметры процесса ферментативной экстракции пектина на разработанном экстракторе

Параметры	-1	0	+1
Частота ультразвуковой обработки, кГц	20	25	30
Скорость перемешивания экстрагента, об/мин	600	800	1000
Время экспозиции при использовании разработанного экстрактора растительного сырья с ультразвуковым генератором и быстроходной мешалкой пропеллерного типа в ферментативной экстракции пектина из столовой свеклы, ч	1	3	5

Экстракцию пектина проводили согласно запатентованному сотрудниками КазНИИ «Перерабатывающей пищевой промышленности» способу - патент Республики Казахстан №29264.

Контрольное испытание – ферментативная экстракция пектина из выжимок столовой свеклы проводили лабораторным способом, согласно патенту РК №29264, без использования экстрактора оснащенного ультразвуковым генератором и быстроходной мешалкой лопастного типа. Результаты контрольного испытания показали, что выход пектина из сухих выжимок столовой свеклы в раствор экстрагента составил 65% от общего его содержания в сырье – 6,89 грамм после 5 часов ферментации.

После контрольного испытания для выявления оптимального режима воздействия УЗ, провели исследование влияния ультразвука (с различной интенсивностью обработки) на выход пектина из выжимок столовой свеклы, результаты исследования приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Результаты определения оптимальной интенсивности УЗ воздействия при ферментативной экстракции пектина на экстракторе

Частота УЗ воздействия, кГц	Содержание пектина 100 гр сухих выжимок столовой свеклы	Время экспозиции, ч				
		1	2	3	4	5
		Выход пектина из сухих выжимок столовой свеклы в раствор экстрагента, %				
20	100% = 6,89 грамм	32,5	43,6	64,3	70,7	70,8
25		45,3	57,2	71,9	72,3	72,4
30		46,6	58,6	72,1	72,5	72,6

Как видно из таблицы 2 наиболее оптимальной интенсивностью обработки ультразвуком при ферментативной экстракции пектина из выжимок столовой свеклы является - 25 кГц, при этом, наибольшее содержание пектина в растворе экстрагента составило 71,9% от общего его содержания в сырье – 6,89 грамм, после 3 часов ферментации, что на 10,5 % больше и на 2 часа быстрее контроля.

Для определения оптимальной скорости перемешивания экстрагента было проведено эксперименты при минимальной скорости – 600 об/мин, средней – 800 об/мин и максимальной - 1000 об/мин. При увеличении скорости свыше 1000 об/мин наблюдалось чрезмерное пенообразование, а при снижении скорости меньше 600 об/мин время на экстракцию сократится по минимуму, в связи с этим был определен данный диапазон скоростей.

В таблице 3 приведены результаты определения оптимальной скорости перемешивания при

ферментативной экстракции пектина на экстракторе из выделенного диапазона скоростей.

Таблица 3 - Результаты определения оптимальной скорости перемешивания при ферментативной экстракции пектина на экстракторе

Скорость быстроходной мешалки, об/мин	Содержание пектина в 100 граммах сухих выжимок столовой свеклы	Время экспозиции в часах				
		1	2	3	4	5
600	100 % = 6,89 грамм	31,3	42,9	54,6	65	63,7
800		38,3	47,6	61,5	65,1	63,9
1000		42,9	49,9	65	63,9	62,8

Как видно из результатов исследований приведенных в таблицы 3 при перемешивании экстрагента со скоростью лопастей мешалки в 1000 об/мин выход пектина дошел до уровня контрольного образца (65% от общего его содержания в сырье – 6,89 грамм) за 3 часа ферментации, когда как лабораторным способом данный показатель достигался с течением 5 часов ферментации. Исходя из вышесказанного, интенсивное перемешивание экстрагента при ферментативной экстракции пектина значительно увеличивает скорость его выхода. Проведенный эксперимент, наглядно указывает на эффективность разработанного экстрактора растительного сырья, оснащенного лопастной мешалкой пропеллерного типа.

Результаты однофакторных экспериментов указанных выше, показали то, что использование как ультразвукового генератора, так и лопастной мешалкой пропеллерного типа значительно увеличивают количество и скорость выхода пектина из растительного сырья, полученного по технологии ранее запатентованной Казахским НИИ Перерабатывающей и пищевой промышленности - «Способ получения пектинсодержащего экстракта из выжимок столовой свеклы районированных в Казахстане для пищевых целей», инновационный патент № 29264.

Технологический режим для ферментативной экстракции пектина работы оптимизирован по следующим параметрам:

- Частота ультразвукового генератора – 25 кГц при интенсивности кавитации - 5 Вт/см²

- Скорость лопастной мешалки пропеллерного типа для интенсивного перемешивания экстрагента - 1000 об/мин.

На рисунке 1 приведены результаты исследования оптимальной продолжительности ферментативной экстракции пектина из столовой свеклы при использовании разработанного экстрактора растительного сырья оснащенного ультразвуковым генератором и быстроходной мешалкой пропеллерного типа.

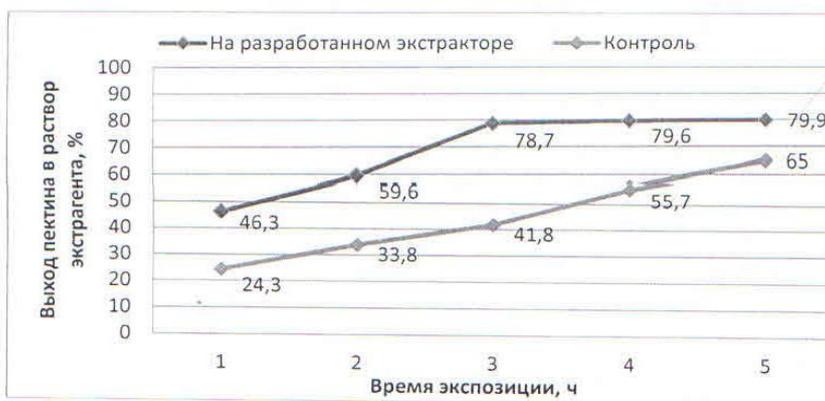


Рисунок 1 – Динамика выхода пектина при ферментативной экстракции выжимок столовой свеклы на разработанном экстракторе

Как видно из результатов, приведенных на рисунке 1 видно, что предложенная конструкция экстрактора растительного сырья позволяет значительно сократить продолжительность ферментативной экстракции пектина – на 2 часа, а также увеличить выход пектина ≈ на 19-21% за счет глубокого воздействия на структуру растительной клетки ультразвуком и вымывания сухих веществ активным перемешиванием экстрагента.

PhD докторант

Химик-аналитик

Научный руководитель, д.т.н, профессор

Велямов Ш.М.
Курасова Л.А.
Джингилбаев С.С.

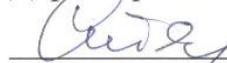
Велямов Ш.М.

Курасова Л.А.

Джингилбаев С.С.

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ТОО «Тургень Эко-Продукт»

 Степаненко С.И.

«22» ноября 2019 г.



А К Т

**производственных испытаний экстрактора
для растительного сырья и выработки пектинсодержащего
экстракта из выжимок столовой свеклы сорта «Бордо»
ферментативным способом**

с.Тургень

«22» ноября 2019 г.

Мы, нижеподписавшиеся, сотрудники ТОО «Тургень Эко-Продукт»: главный технолог, Клыпина Л.Г. и начальник производства, Цапков Н.И., профессор кафедры: «Машины аппараты пищевых производств» Алматинского технологического университета, Джингилбаев С.С. и PhD докторант кафедры Велямов Ш.М., сотрудники лаборатории: «Биотехнологии, качества и пищевой безопасности» ТОО «КазНИИ перерабатывающей и пищевой промышленности»: химик-аналитик, Курасова Л.А. и научный сотрудник Бек Р.Б. составили настоящий акт о том, что в период с 18 ноября по 22 ноября 2019 года были проведены производственные испытания экстрактора для растительного сырья.

Экстрактор разработан докторантом Велямовым Ш.М., под руководством профессора Джингилбаева С.С., который оснащен ультразвуковым излучателем, а также быстроходной мешалкой с целью интенсификации процесса экстракции пектина из растительного сырья. Экстрактор предназначен для производства пектинсодержащего экстракта из растительного сырья (в данной работе использовали выжимки столовой свеклы сорта «Бордо») ферментативным способом. Полученный экстракт предназначен для обогащения соковой продукции с целью увеличения функциональных и полезных свойств готовой продукции.

Конструированный для производственных испытаний экстрактор вмещает в себя 1 кг растительного сырья и 15 литров экстрагента. За один период переработки (3 часа) выжимок столовой свеклы на экстракторе получаем в среднем: 10-11 л пектинсодержащего экстракта с концентрацией пектина - 5...6 г/л. Поскольку минимальная суточная норма пектина при

профилактическом питании составляет - 1,0 гр., тогда минимальный объем экстракта с концентрацией 5...6 г/л составляет 200 мл.

Исходя из вышеизложенного, при производстве 1 л плодовоовощного сока обогащенного пектинсодержащим экстрактом, необходимо смешать 800 мл сока с 200 мл полученного экстракта. Таким образом, 10 л экстракта достаточно для производства 50 л плодовоовощных обогащенных соков.

При непрерывной работе экстрактора в течение 1 смены (9 часов), произведено 32 литра пектинсодержащего экстракта. Концентрация пектина в общем объеме экстракта составила - 5,4 г/л.

Полученного объема экстракта достаточно для производства 160 л плодовоовощного обогащенного сока, а предложенная модель экстрактора показала свою пригодность для малых и средних предприятий по производству натуральных плодовоовощных соков.

Экономический эффект от использования предлагаемой установки зависит от маркетинговой работы предприятия. Из расчетов затрат на производство пектинсодержащего экстракта из столовой свеклы на разработанном экстракторе - себестоимость 1 л экстракта не превышает 100 тенге. А себестоимость соков в результате обогащения - не повысится более чем на 20 тенге, тогда как их «ценность» для здоровья за счет обогащения пектинсодержащим экстрактом увеличится во много раз. При верной политике цен и рекламе новой продукции малые и средние предприятия могут значительно увеличить свою прибыль.

Подписи:



ТОО «Тургень Эко-Продукт»:

Тургень Э.П. Главный технолог
Начальник производства

Клыпина Л.Г.
Цапков Н.И.

Кафедры: «Машины аппараты пищевых производств» (АТУ):

Д.т.н., профессор
PhD докторант

Джингилбаев С.С.
Велямов Ш.М.

ТОО «КазНИИ перерабатывающей и пищевой промышленности»:

Химик-аналитик
Научный сотрудник

Курасова Л.А.
Бек Р.Б.

«НУТРИТЕСТ» Жауапкершілігі шектеулі Серіктестігі		Товарищество с ограниченной ответственностью «НУТРИТЕСТ»
---	---	---

Учредитель ТОО «ОО Казахская Академия питания»

050008, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Клочкова, 66, тел/факс (8 727) 375 82 23,
 Расчетный счет KZ879261802121361000 в АО Казкоммерцбанк, БИК KZKOKZKX, Кбе 18, КНП 859,
 РНН 600700204801

№ 1385

ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ

Наименование и адрес заявителя: ТОО «Каз НИИПП»

Наименование и обозначение испытываемого образца: Сгущенный пектиносодержащий экстракт полученный из выжимки столовой свеклы сорта «Бордо»

Обозначение НД на продукцию: ЕСЭГТ, утв. реш. КТС № 299 от 28.05.2010г., п.п. 6.1, 6.11, Приложение 3 п. 8

Условия проведения испытаний: Температура 20 °С; влажность 66 %

Наименование показателей, единицы измерений	Допустимые нормы по НД	Фактически получено	Обозначение НД на методы испытаний
1	2	3	4
Органолептические:			
Внешний вид, цвет, запах	-	Непрозрачная подвижная жидкость коричневого цвета с характерным запахом	Визуально, органолептически
Пищевая ценность, г/100 г:			
Белок	-	1,9	ГОСТ 26889-86
Жир	-	0,15	ГОСТ 8756.21-89
Углеводы	-	15,38	И.М. Скурихин, 1987 г.
Влага	-	81,47	ГОСТ 28561-90
Зола	-	1,10	И.М. Скурихин, 1984 г.
Энергетическая ценность, ккал	-	70	И.М. Скурихин, 1987 г.
Содержание витаминов, в 100 г:			
А, мкг	-	0	ГОСТ 7047-55
Е, мг, %	-	0,09	ГОСТ 30627.3-98
РР, мг, %	-	0,12	ГОСТ 7047-55
β-каротин, мкг	-	8,0	ГОСТ 8756.22-80
Минеральные вещества, в 100 г:			
Кальций, мг	-	49±9,8	СТ РК ИСО 12081-2010
Железо, мг	-	1,47±0,29	ГОСТ 26928-86
Медь, мг	-	0,531	СТ РК ГОСТ Р 51301-2005
Цинк, мг	-	0,223	СТ РК ГОСТ Р 51301-2005
Токсичные элементы, мг/кг, не более:			
Свинец	0,5	0,311	СТ РК ГОСТ Р 51301-2005
Кадмий	0,03	Не обн.	СТ РК ГОСТ Р 51301-2005
Мышьяк	0,2	Не обн.	ГОСТ 26930-86
Ртуть	0,02	Не обн.	ГОСТ 26927-86
Пестициды, мг/кг, не более:			
ГХЦГ (α, β, γ – изомеры)	0,1	0,0024	СТ РК 2011-2010
ДДТ и его метаболиты	0,1	Не обн.	СТ РК 2011-2010
Нитраты, мг/кг	1400	401	ГОСТ 29270-95
Радионуклиды, Бк/кг, не более:			
Цезий – 137	80	5,5	МИ № КЗ 07.00.00304-2009
Стронций – 90	40	Не обн.	МИ № КЗ 07.00.00303-2009

Заключение: В результате проведенных исследований натуральный экстракт полученный из выжимки столовой свеклы «Бордо» может быть использован в пищевой промышленности.

Исполнители:

Заведующая ИЛ

Семин



Полученные результаты распространяются только на образец, подвергнутый испытанию