



**Министерство образования и науки  
Российской Федерации  
Рубцовский индустриальный институт (филиал)  
ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический  
университет им. И.И. Ползунова»**

**В.В. Гриценко**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МАШИННО-  
АППАРАТУРНОГО ОФОРМЛЕНИЯ ПРОЦЕССОВ  
ПРОИЗВОДСТВА ЖИДКИХ  
КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ПИЩЕВЫХ  
ПРОДУКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
РОТОРНОГО РАСПЫЛИТЕЛЬНОГО  
ВЫПАРНОГО АППАРАТА**

Монография

Рубцовск 2014

УДК 664.002.5  
ББК 36.81  
Г85

**Рецензенты:**

доктор технических наук, профессор А.Ф. Сорокопуд  
кандидат технических наук, профессор В.А. Куничан

**Гриценко В.В.** Совершенствование машинно-аппаратурного оформления процессов производства жидких концентрированных пищевых продуктов с использованием роторного распылительного выпарного аппарата: Монография / В.В. Гриценко / Рубцовский индустриальный институт. – Рубцовск, 2014. – 135 с.

**ISBN 978-5-9903604-8-8**

Монография посвящена изучению комплекса вопросов, связанных с повышением эффективности работы роторного распылительного выпарного аппарата, предназначенного для проведения процессов деалкоголизации и концентрирования плодово-ягодных водных и водно-спиртовых экстрактов. При этом основной акцент в работе сделан на интенсификацию теплообмена в выпарном аппарате. Определены рациональные параметры и режимы процессов деалкоголизации и концентрирования водно-спиртовых экстрактов боярышника кроваво-красного и калины обыкновенной. Предложена методика расчета роторных распылительных испарителей, обогреваемых водно-воздушной смесью. Кроме того, в работе экспериментально исследованы теплофизические свойства экстрактов боярышника кроваво-красного и калины обыкновенной. Разработана технологическая схема производства концентрированных экстрактов боярышника кроваво-красного и калины обыкновенной. Разработаны проектные рецептуры безалкогольных напитков с добавлением концентрированных экстрактов боярышника и калины, а также бизнес-план организации производства экстрактов на ООО «Савой» (г. Рубцовск Алтайского края).

Работа адресована специалистам, занимающимся разработкой машинно-аппаратурного оформления технологий производства концентрированных жидких пищевых продуктов, а также преподавателям, студентам и аспирантам, изучающим процессы и аппараты пищевых производств.

УДК 664.002.5  
ББК 36.81

**ISBN 978-5-9903604-8-8**

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	5
<b>ГЛАВА 1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ</b> .....	10
1.1 Конструкции роторных испарителей.....	10
1.2 Теплообмен в роторных испарителях и пути его интенсификации.....	19
1.3 Характеристика и свойства экстрактов из ягод боярышника кроваво-красного и калины обыкновенной.....	23
1.3.1 Химический состав и питательная ценность плодово-ягодного сырья и экстрактов.....	24
1.3.2 Физические и теплофизические свойства экстрактов.....	26
1.4 Выводы по главе.....	30
<b>ГЛАВА 2 ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭКСТРАКТОВ ИЗ ЯГОД БОЯРЫШНИКА КРОВАВО- КРАСНОГО И КАЛИНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ</b> .....	32
2.1 Методы и порядок проведения экспериментальных исследований.....	32
2.2 Методика получения образцов экстрактов.....	41
2.3 Анализ результатов исследований теплофизических свойств.....	43
2.4 Оценка погрешности измерений теплофизических свойств.....	51
2.5 Выводы по главе.....	58
<b>ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ДЕАЛКОГОЛИЗАЦИИ И КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ ЖИДКИХ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ В РОТОРНОМ РАСПЫЛИТЕЛЬНОМ ИСПАРИТЕЛЕ</b> .....	59
3.1 Теплообмен на контактном элементе роторного распылительного испарителя.....	60
3.2 Анализ условий теплоотдачи в греющей рубашке.....	62
3.3 Схема экспериментальной установки и методика проведения эксперимента.....	69

3.4 Результаты экспериментальных исследований процесса теплообмена при концентрировании и деалкоголизации жидких пищевых смесей.....	78
3.5 Выводы по главе.....	99
<b>ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА И РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ПРАКТИЧЕСКОМУ ПРИМЕНЕНИЮ РОТОРНОГО РАСПЫЛИТЕЛЬНОГО ИСПАРИТЕЛЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ПЛОДОВО-ЯГОДНЫХ ЭКСТРАКТОВ.....</b>	<b>100</b>
4.1 Разработка методики расчета.....	100
4.2 Разработка рекомендаций по использованию РРИ для деалкоголизации и концентрирования водно-спиртовых плодово-ягодных экстрактов.....	104
4.3 Разработка рекомендаций по практическому применению концентрированных экстрактов боярышника кроваво-красного и калины обыкновенной.....	108
4.4 Выводы по главе.....	110
<b>ВЫВОДЫ.....</b>	<b>112</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>113</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ.....</b>	<b>124</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Немаловажное значение в оценке фактического питания и метаболического статуса организма человека отводится витаминам – незаменимым пищевым веществам, необходимым для осуществления основных жизненных функций. Задача оптимального обеспечения организма витаминами, минеральными веществами может быть успешно решена путем обогащения ими пищевых продуктов массового потребления и специального назначения.

Проблема сбалансированного питания, снабжения населения высококачественными продуктами является одной из важных социальных проблем. Одним из путей ее решения является обеспечение качества и увеличение объемов производства консервированных продуктов с повышенной пищевой ценностью, получаемых путем выпаривания.

Одним из направлений в создании продукции повышенной пищевой ценности в различных отраслях пищевой промышленности является производство продуктов с использованием плодово-ягодного сырья. В условиях Западной Сибири хорошо районированы плоды ягодных культур черной и красной рябины, черной и красной смородины, боярышника, калины и другие. Они дают устойчивые, высокие урожаи с большим содержанием витаминов и биологически активных веществ. Использование местного плодово-ягодного сырья позволит расширить сырьевую базу, ассортимент выпускаемой продукции повышенной биологической ценности, снизить рынок продуктов питания, в состав которых входят искусственные химически синтезированные вкусовые добавки, понизить затраты на перевозку полуфабрикатов, а следовательно, и себестоимость продукции. Однако объемы переработки плодово-ягодного сырья до сих пор недостаточны. Поэтому разработка новых технологий и оборудования, интенсификация традиционных методов переработки плодово-ягодного сырья, путем упаривания с целью более эффективного извлечения ценных веществ, является актуальной научно-технической задачей.

Одним из современных способов переработки плодово-ягодного сырья яв-

ляется его экстрагирование водно-спиртовым растворителем с последующей деалкоголизацией и упариванием полученных экстрактов, для получения более концентрированных растворов.

Концентрированные экстракты содержат большее количество биологически активных веществ, длительно сохраняются и отличаются простотой внесения в продукт, обеспечивая его оригинальность, хорошие органолептические показатели, привлекательный внешний вид, а следовательно, их применение повышает его конкурентоспособность [8, 23, 60].

Однако процесс концентрирования экстрактов выпариванием неразрывно связан с необходимостью повышения температуры последних, и при термическом воздействии ухудшается вкусовая и пищевая ценность продуктов, теряются их полезные свойства. Поэтому их деалкоголизация и концентрирование должны проводиться при невысоких температурах и с небольшой продолжительностью контакта продукта с теплообменной поверхностью. То есть при проведении этих операций необходим оптимальный температурно-временной режим. С этой точки зрения наиболее рациональным и экономически выгодным способом деалкоголизации и концентрирования жидких пищевых смесей является выпаривание под вакуумом. Анализ данных, полученных в результате обзора научно-технической литературы, показал, что в пищевой промышленности широкое распространение для концентрирования жидких пищевых продуктов получили пленочные и роторно-пленочные вакуумные аппараты [10, 40, 58].

Одним из перспективных видов оборудования для концентрирования жидких пищевых продуктов являются роторные распылительные испарители (РРИ), отличающиеся высокой эффективностью тепло- и массообменных процессов [86, 106, 112]. Формирование поверхности контакта фаз в РРИ осуществляется при многократном диспергировании раствора в поле центробежных сил. Достигнутая таким путем дополнительная турбулизация пленочного течения жидкости в аппарате предопределяет высокую интенсивность процессов теплообмена. РРИ обладают небольшим гидравлическим сопротивлением, компактны, требуют невысоких затрат энергии на организацию своей работы [31, 86, 106].

Концентрирование жидких пищевых продуктов происходит в условиях активно протекающего теплопереноса, поэтому для определения необходимой площади рабочей поверхности РРИ или выбора режимных параметров его работы надо иметь численные значения коэффициентов теплопередачи, как показателей интенсивности этих процессов.

Недостаточная изученность процесса теплопередачи в РРИ, а в частности, теплоотдачи к поверхности теплообмена от греющей воды, при интенсивной турбулизации последней воздухом не позволяет в полной мере реализовать преимущества РРИ на практике и препятствует широкому использованию в пищевой промышленности.

Для изучения процесса теплообмена, установления рациональных режимов dealкоголизации и концентрирования экстрактов из плодов боярышника кроваво-красного и калины обыкновенной необходимо знать их физико-химические и теплофизические свойства. Они также необходимы при расчете и выборе элементов РРИ, при выборе технологических режимов переработки и т.п.

В свете вышесказанного представляется актуальным проведение исследований процесса теплообмена в РРИ с целью повышения его интенсивности за счет турбулизации греющего агента (горячей воды) воздухом при концентрировании жидких пищевых продуктов, а также решение практических задач проектирования промышленных установок. Поэтому данная работа направлена на исследование процессов концентрирования пищевых продуктов в РРИ и разработку технологий производства концентрированных экстрактов боярышника кроваво-красного и калины обыкновенной.

Данная работа характеризуется следующими показателями:

- получены эмпирические зависимости для расчета коэффициентов теплопроводности, удельной теплоемкости и температуропроводности экстрактов боярышника кроваво-красного и калины обыкновенной в диапазонах температуры, концентраций сухих веществ и спирта, удовлетворяющих практическим требованиям;

- исследованы основные закономерности теплообмена в РРИ при подаче воздуха в горячий теплоноситель;

- определены рациональные режимы dealкоголизации и концентрирования экстрактов боярышника кроваво-красного и калины обыкновенной;

- получена экспериментально - статистическая модель для расчета коэффициента теплоотдачи в греющей рубашке РРИ при обогреве последнего водно-воздушной смесью;

- предложена методика расчета РРИ для получения концентрированных экстрактов из плодово-ягодного сырья;

- разработана технологическая схема получения концентрированных экстрактов из плодов боярышника кроваво-красного и калины обыкновенной с использованием РРИ;

- разработаны проектные рецептуры безалкогольных напитков с добавлением концентрированных экстрактов боярышника кроваво-красного и калины обыкновенной, рекомендованные для внедрения на ООО «Савой» (г. Рубцовск Алтайского края), а также бизнес-план организации производства экстрактов на данном предприятии;

- материалы данной работы используются в учебном процессе на кафедре ТиТМиПП РИИ АлтГТУ при выполнении дипломного проектирования с элементами научного поиска студентами специальности «Машины и аппараты пищевых производств»;

Основные положения монографии представлялись: на всероссийских научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Проблемы социального и научно-технического развития в современном мире» (г. Рубцовск 2007 - 2009 гг.); на IX Международной конференции молодых ученых «Пищевые технологии и биотехнологии» (г. Казань, 2008 г.); на научных семинарах кафедры МАПП КемТИПП (г. Кемерово, 2007 – 2009 г.г.).

Основное содержание исследований опубликовано в 16 работах, в том числе 2- в центральных изданиях.

Монография выполнена на 137 страницах машинописного текста, состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка использованной литературы (132 источника), 9 приложений, содержит 43 рисунка и 6 таблиц.



Целью настоящей работы является изучение основных закономерностей процесса концентрирования пищевых продуктов с использованием роторного распылительного испарителя и разработка на этой основе технологии производства концентрированных экстрактов из плодов боярышника кроваво-красного и калины обыкновенной.

Для достижения поставленной цели определены следующие задачи:

- исследование теплофизических свойств экстрактов из плодов боярышника кроваво-красного и калины обыкновенной, получение расчетных уравнений для их определения;

- изучение теплоотдачи при dealкоголизации и концентрировании жидких пищевых продуктов к поверхности теплообмена РРИ от горячего теплоносителя в условиях турбулизации последнего воздухом;

- определение рациональных режимов dealкоголизации и концентрирования плодово-ягодных экстрактов боярышника кроваво-красного и калины обыкновенной в РРИ;

- разработка методики расчета и рекомендаций по промышленному использованию РРИ для получения концентрированных экстрактов из плодов боярышника кроваво-красного и калины обыкновенной;

- разработка рекомендаций по использованию концентрированных экстрактов в качестве витаминно-вкусовых добавок для безалкогольных напитков.

# ГЛАВА 1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

## 1.1 Конструкции роторных испарителей

Оценка ведущих тенденций развития пищевой промышленности [8, 31, 41, 54, 60, 90, 106] показывает, что вопросы увеличения выпуска и расширения ассортимента продукции при одновременном повышении качества, биологической ценности продукта и экологических характеристик процесса связаны с выбором методов и оптимальных режимов переработки, с созданием рациональных конструкций аппаратов. При этом большое значение имеет осуществление эффективных процессов теплообмена между потоками с минимальными затратами энергии [86, 87].

Большинство биологически активных веществ, витаминов, микроэлементов и других полезных для питания соединений, содержащихся в жидких пищевых продуктах, являются термолабильными веществами. Поэтому в аппаратах для термообработки, деалкоголизации и концентрирования жидких пищевых продуктов термическое воздействие на них должно быть минимальным как по времени, так и по величине температуры.

Степень термического воздействия характеризуется двумя факторами: интенсивным - температурой и экстенсивным - продолжительностью пребывания продукта в зоне нагрева. Данным требованиям в полной мере отвечают вакуумные выпарные аппараты, пригодные для осуществления многих теплофизических процессов: ректификации, дистилляции, выпаривания и др., широко распространенных в пищевой промышленности [34, 40, 52, 54]. Выпаривание под вакуумом позволяет снизить температуру кипения раствора, что, с одной стороны, уменьшает опасность разложения или пригорания термочувствительных компонентов жидких пищевых продуктов, а с другой - дает возможность использовать более дешевые теплоносители.

Для проведения тепло- и массообменных процессов под вакуумом используются насадочные и тарельчатые колонны, трубчатые выпарные аппараты, пленочные тепло- и массообменные испарители [34, 40, 52, 54].

Широкое распространение в пищевых производствах получили также

трубные выпарные аппараты с естественной и принудительной циркуляцией [34]. Существенно повысить эффективность процессов теплообмена можно за счет проведения их в тонких слоях (жидкостных пленках) пленочных аппаратов (ПА) [12, 34, 100]. Это видно из следующей зависимости [12]:

$$\frac{\alpha}{\alpha_{тр}} = \frac{d_{вн}^2}{4\delta(d_{вн} - \delta)}, \quad (1.1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи в жидкостной пленке;  $\alpha_{тр}$  – коэффициент теплоотдачи при течении жидкости по всему сечению трубы;  $\delta$  – средняя толщина пленки;  $d_{вн}$  – внутренний диаметр трубы. Обычно значение  $\alpha$  в 2,2 и более раз превышает  $\alpha_{тр}$  [12].

Основными преимуществами ПА являются [34, 52]: развитая, постоянная по величине и строго определенная поверхность контакта фаз, что особенно важно при тепло - и массообмене; высокие скорости движения тонкого слоя обрабатываемого раствора, что резко сокращает время его соприкосновения с поверхностью теплообмена, при этом повышается пропускная способность ПА; сохранение равномерности потоков по высоте аппарата; устойчивость работы при колебании нагрузок и в широком интервале давлений; постоянство температуры кипения по высоте, так как давление по высоте остается неизменным, т.е. отсутствуют температурные потери на гидростатическую депрессию; низкое гидравлическое сопротивление и др.

Однако наряду с перечисленными достоинствами ПА существует и ряд существенных недостатков, усложняющих их изготовление и использование [34]: - неустойчивость работы при колебаниях давления греющего пара; создание устойчивого тонкого равномерного жидкостного слоя по поверхности теплообмена ПА требует специальных распределительных устройств, усложняющих их конструкцию; трубчатые пленочные аппараты все же отличаются невысоким коэффициентом теплопередачи, поскольку жидкость по поверхности трубок движется в режиме, близком к ламинарному.

Вопросы генерирования пленки значительно упрощаются при использова-

нии роторных пленочных аппаратов (РПА), в которых распределение жидкости по поверхности теплообмена обеспечивается специальными устройствами.

Принципиальная особенность РПА, предопределяющая их высокую эффективность, заключается в том, что формирование пленочного течения продукта и его интенсивная турбулизация осуществляется в них под действием лопастей, укрепленных на валу вращающегося ротора. В результате этого гидродинамика течения обрабатываемого продукта в РПА является более активной, а интенсивность теплофизических процессов более высокой, чем в ПА. Коэффициенты теплоотдачи при термообработке пищевых продуктов в РПА при обогреве паром достигают значений, равных 2300-2700 Вт/(м<sup>2</sup>·К), в то время как в аппаратах с падающей пленкой 1500-1600Вт/(м<sup>2</sup>·К) [34]. Обзор конструкций РПА представлен в работах [34, 40, 52, 80].

Кроме серийно выпускаемых РПА [80], в пищевой промышленности применяются РПА, предназначенные для обработки конкретных видов продуктов, в соответствии с требованиями пищевой технологии и условий их эксплуатации на предприятиях. В ЛТИХПе, ВНИИЖе, Ленинградском межотраслевом НИИ пищевой промышленности были разработаны РПА, нашедшие широкое применение в ряде пищевых производств [10].

Структура жидкостного потока в РПА отличается значительной сложностью: в погруженном режиме работы перед лопастями образуются носовые волны; за лопастью располагается зона вихревого движения пленки (вихревой след), переходящая под влиянием сил вязкостного трения в зону успокоения и свободного стекания пленки. Характерно, что при больших величинах плотности орошения теплообменной поверхности объем продукта в носовых волнах достигает 50 ÷ 90 % от удерживающей способности аппарата, а средняя скорость осевого течения в носовых волнах существенно выше, чем в пленке. По этим причинам происходит «проскок» части продукта через рабочую зону контактного элемента (КЭ) аппарата без эффективного испарения с поверхности пленки. С повышением вязкости обрабатываемого материала имеет место сокращение протяженности вихревого следа, приводящее к уменьшению зоны интенсивного перемешивания пленки за лопастью.

Для устранения этих недостатков, обуславливающих ограничение эффек-

тивности работы РПА, и интенсификации процесса теплообмена при концентрировании продукта в РПА в [49] предложен новый, более активный гидродинамический режим работы, сочетающий в себе турбулизацию пленки капельно-струйным потоком продукта наряду с механическим ее перемешиванием лопастями ротора. Пленочно-струйный режим переработки жидких продуктов реализован в разработанной конструкции роторного пленочно-струйного испарителя (РПСИ). Поперечное сечение его представлено на рисунке 1.1. РПСИ состоит из вертикального цилиндрического корпуса 1, снабженного греющей рубашкой 2. Внутри корпуса расположен ротор 3, представляющий собой вал с лопастями 4, в которых выполнены продольные окна 6, предназначенные для перетока жидкости из носовых волн. Позади лопастей 4, на уровне среза окна, расположены перфорированные пластины 5. Часть распределительной пластины, примыкающей к лопасти 4, выполнена сплошной (не содержащей перфорации).

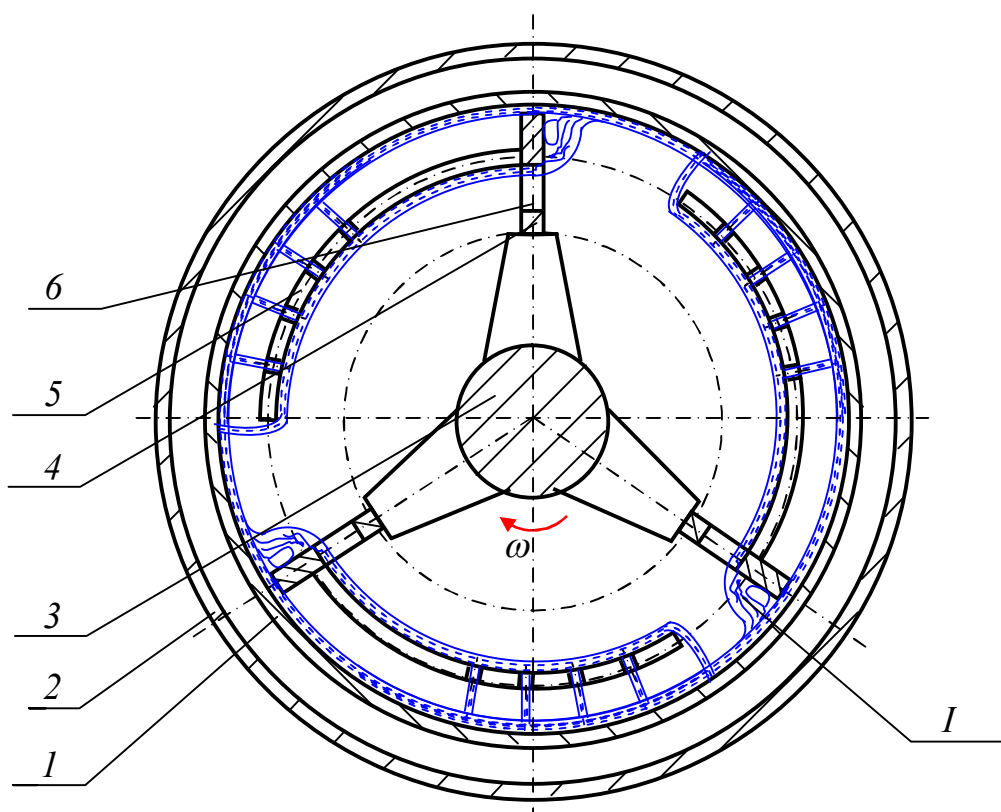


Рисунок 1.1 – Схема роторно-пленочно-струйного испарителя

РПСИ работает следующим образом. Исходный раствор поступает в верхнюю часть корпуса 1 и распределяется лопастями 4 по внутренней его поверх-

ности. При этом часть продукта накапливается перед лопастями, образуя носовые волны I. Достигнув среза окна 6, излишек упариваемого раствора из носовых волн перетекает на распределительную пластину 5. Раствор, растекаясь под действием центробежной силы по поверхности пластины, достигает отверстий перфорации и сбрасывается в виде капель и струй на свободную поверхность пленки за лопастью. В результате пленочный поток получает дополнительные импульсы от падающих струй жидкости, благодаря чему достигается равномерное и интенсивное перемешивание обрабатываемого раствора. Кроме того, в РПСИ происходит существенное развитие межфазовой поверхности и более полное ее обновление за счет эффективного перераспределения раствора между носовой волной и пленкой за лопастями. Такая особенность РПСИ делает его пригодным для проведения процессов в системе газ – жидкость.

Удельный съём пара в РПСИ на 30 – 35 % выше, чем в известных РПА.

Эффект удара капель жидкости по поверхности пленки, позволяющий повысить интенсивность тепло- и массообменных процессов, применен в конструкции роторных распылительных испарителей (РРИ) [4, 31, 40, 52, 86, 87, 106]. Межфазовая поверхность контакта в РРИ образуется как при диспергировании жидкости вращающимся ротором в виде струй и капель, так и при турбулизации ударяющимися каплями пленки жидкости, стекающей по поверхности пластинок пристенных каплеотбойников и обогреваемого корпуса, что позволяет существенно интенсифицировать процесс теплопередачи.

Конструктивное исполнение РРИ разнообразно. Известны конструкции как горизонтального, так и вертикального типа. С диспергирующими устройствами, выполненными в виде пакетов полых усеченных конусов и концентрических колец, а также в виде перфорированных цилиндров.

Следует отметить то, что общим недостатком РРИ с распылителями, выполненными в виде пакетов полых усеченных конусов и концентрических колец, является сложность и тяжеловесность конструкции. Сборка и балансировка таких распылителей представляет значительную трудность.

С этой точки зрения цилиндрическая форма диспергирующих устройств

представляется наиболее рациональной. Кроме того, распылитель, выполненный в виде перфорированного цилиндра, позволяет распределить жидкость не только по окружности в одном сечении, но и по высоте секции. Этот принцип положен в основу конструкции РРИ, разработанного группой сотрудников ГИАПа [40]. Испаритель ГИАПа (рисунок 1.2) представляет собой обогреваемый снаружи вертикальный цилиндрический корпус 1, внутри которого соосно установлен вращающийся ротор. Корпус испарителя разделен по высоте на секции. Внутри каждой секции на валу 3 ротора смонтированы полые тонкостенные барабаны 2, стенки которых гофрированы в вертикальном направлении. На выступах гофр по винтовым нисходящим линиям расположены отверстия 6 для выброса жидкости на теплообменную поверхность, а во впадинах гофр по высоте барабана имеются отверстия 10 для прохода пара. В корпусе каждой секции испарителя имеется кольцевой сборник 8 с лотками, предназначенный для отбора жидкости с теплообменной поверхности вышележащей секции и последующей ее подачи в нижерасположенный барабан. В верхней части испарителя на валу ротора установлено устройство для равномерной подачи обрабатываемой жидкости в барабан и центробежный сепаратор с наклонными лопастями.

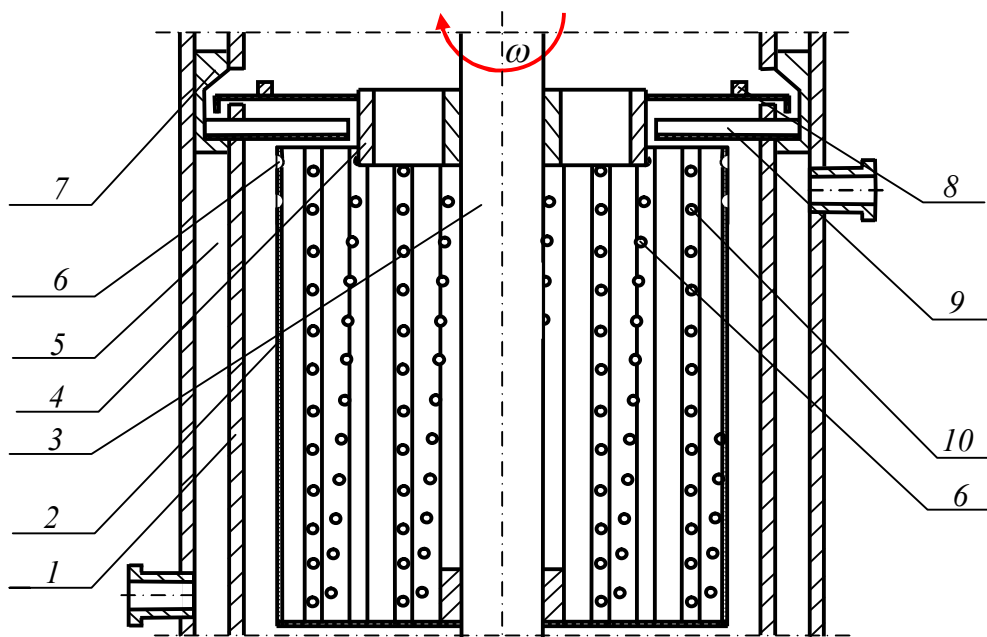


Рисунок 1.2 – Схема роторного испарителя ГИАПа

При работе испарителя исходная смесь через распределительное устройство поступает на верхнее кольцо 4 гофрированного барабана. Под действием центробежной силы жидкость отбрасывается на внутреннюю поверхность барабана и по выступам гофр распределяется на ряд вертикальных потоков. Через отверстия на выступах гофр барабана струи и капли жидкости выбрасываются на теплообменную поверхность испарителя и образуют стекающую вниз пленку, турбулизируемую этими струями. Часть этой жидкости испаряется на теплообменной поверхности, а неиспарившаяся часть стекает в кольцевой сборник 8 и по желобам 7 и 9 перетекает в распределительный барабан нижележащей секции, и цикл повторяется. Сконцентрированный раствор удаляется из аппарата через нижний штуцер, а образующиеся пары поднимаются вверх, в пространство 5 между корпусом и барабанами, а также внутри них и, пройдя сепаратор, выводятся из верхней части аппарата. Отсепарированные капли жидкости лопастями отбрасываются на стенку аппарата.

Данный испаритель характеризуется высоким коэффициентом теплопередачи. Производительность РРИ ГИАПа по воде составляет  $200 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  при давлении греющего пара 1,0 – 1,5 МПа, рабочем давлении 0,133-98,1 кПа и окружной скорости ротора 5 – 9 м/с. Однако конструкция данного РРИ довольно сложна и может быть существенно упрощена при сохранении основных технических характеристик.

Существенным недостатком вышеупомянутого РРИ является также то, что обрабатываемая жидкость однократно циркулирует в пределах одного КЭ. Ввиду этого, для достижения заданной четкости разделения, возрастает число секций в РРИ. Это недостаток отсутствует в РРИ с многократной циркуляцией жидкости на одном КЭ [31, 87, 91, 106].

В РРИ с многократной циркуляцией обрабатываемой жидкости на одном КЭ используется более активный гидродинамический пленочно-капельный режим, формирование пленочного течения и интенсивная турбулизация пленки осуществляется при многократном диспергировании раствора в поле центробежных сил, что позволяет существенно интенсифицировать тепло- и массооб-



менные процессы. В РРИ данного типа отсутствует «проскок» продукта, поскольку режим многократной циркуляции на каждом КЭ обеспечивает заданное время задержки. Данный РРИ отличается также широким диапазоном нагрузки по жидкой фазе и способен обеспечить гораздо большее время контакта жидкого продукта с теплообменной поверхностью, а время нахождения продукта в РРИ может регулироваться путем изменения подачи и числа оборотов ротора. Кроме того, аппараты с диспергирующим устройством в виде перфорированного цилиндра имеют следующие преимущества: простота изготовления и компактность диспергирующего устройства; возможное регулирование плотности орошения и дисперсности распыла за счет изменения диаметра перфорации и частоты вращения распылителя; лучшее использование межтарельчатого пространства за счет большей высоты диспергирующего устройства.

В организации работы РРИ существенным элементом являются пристенные каплеотбойники [74, 86, 91], уменьшающие количество отраженных от корпуса капель, тем самым значительно снижающие количество брызг, унесенных вторичным паром. Анализ конструкций, представленный в работе [86], показал ряд преимуществ пристенных каплеотбойников, выполненных в виде вертикально установленных металлических пластин, направленных под углом 15...25° по касательной к окружности диспергирующего устройства.

В конструкциях РРИ, предлагаемых различными авторами [22, 40, 66, 87, 92, 99], одним из наиболее существенных отличий является конструкция заборного устройства (ЗУ). Стремление обеспечить наибольшую производительность ЗУ при наименьших удельных затратах энергии и привело к большому разнообразию их конструкций. ЗУ с заборными лопатками ломаного профиля обеспечивают наибольшую производительность при меньших затратах энергии [66, 92, 99].

Исходя из анализа рассмотренных выше конструкций, можно сделать вывод, что РРИ с диспергирующими устройствами в виде перфорированных цилиндров и многократной циркуляцией обрабатываемой жидкости на одном КЭ отвечают требованиям, предъявляемым к переработке термолабильных пищевых продуктов и процессам деалкоголизации и концентрирования водно-

спиртового плодово-ягодного сырья. Поэтому объектом исследований была выбрана конструкция РРИ [87, 106] (рисунок 1.3).

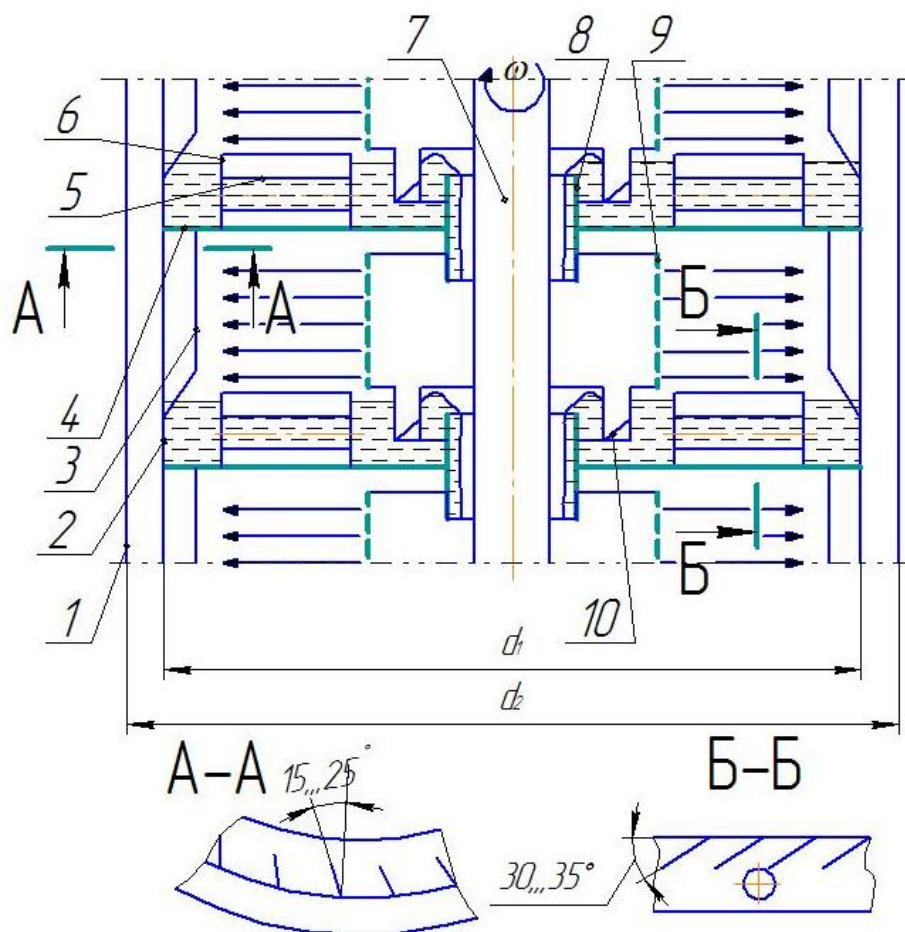


Рисунок 1.3 – Схема контактного элемента роторного распылительного испарителя

Роторный распылительный испаритель содержит рубашку 1, внутри которой подается греющий агент, корпус 2, пластины каплеотбойники 3, сливную тарелку 4 с переточными трубами 5 и направляющими пластинками 6, вал 7, переток жидкости 8, диспергирующее устройство (ДУ) 9 и (ЗУ) 10.

РРИ работает следующим образом. Исходный продукт с вышерасположенного КЭ (совокупность распылителя, каплеотбойника и тарелки) через переток 8 сливается в ДУ распылителя 9, откуда вместе с продуктом, поступившим с питающей тарелки 4, разбрызгивается в свободное пространство КЭ. Достигнув пластин 3, жидкость растекается по ним в пленку и получает тепло, поскольку пластины плотно соединены с корпусом 2. Пленки жидкости на по-

верхности пластин 3 интенсивно турбулизируются ударяющимися каплями, что повышает интенсивность процесса тепло – массообмена. Далее жидкость выходит на корпус 2, где интенсивно перемешивается, за счет энергии движения, и затем по пластинам 3 и корпусу 2 стекает на сливную тарелку 4, откуда большая ее часть подается ЗУ 10 в ДУ 9. Остальная часть жидкости в количестве, равном количеству свежепоступившей на тарелку по перетоку 8, сливается в нижерасположенный КЭ. Восходящий поток пара с помощью направляющих 6, установленных в газоходах под углом 30...35°, приобретает вращательное движение на каждом КЭ. Это увеличивает время контакта пара и жидкости и способствует дополнительной турбулизации контактирующих фаз.

РРИ диаметром 0,15 м используется в опытном производстве на кафедре МАПП Кемеровского технологического института пищевой промышленности [86, 87, 106] и успешно испытан при концентрировании экстрактов красной и черной смородины, красной и черной рябины, тысячелистника и зверобоя; концентрировании и дезодорации молока; концентрировании растворов солей. Он отличается высокой интенсивностью процесса [87, 106]. В условиях обогрева водой коэффициент теплоотдачи от рабочей поверхности к раствору достигает 1500...2800 Вт/(м<sup>2</sup>·К), а удельный паросъем – 90...130 кг/(м<sup>2</sup>·ч). Для сравнения, в роторно – пленочном испарителе с жестким ротором коэффициент теплоотдачи составляет 1500...3500 Вт/(м<sup>2</sup>·К), а удельный паросъем – 70...170 кг/(м<sup>2</sup>·ч). Однако в качестве греющего агента в последнем случае используется пар давлением 0,4 ... 0,3 МПа [52].

## **1.2 Теплообмен в роторных испарителях и пути его интенсификации**

Процесс теплообмена в роторных испарителях довольно сложен. В настоящее время сведения, характеризующие их работу, довольно скудны. Это связано с большим количеством факторов, влияющих на коэффициент теплоотдачи, важнейшими из которых являются давление в аппарате, температура входа раствора, скорость вращения ротора, удельная тепловая нагрузка, плотность

орошения, физические и теплофизические свойства жидких пищевых продуктов, режим течения теплоносителя и др. [6, 40, 82, 110, 116].

Показателем интенсивности процесса теплообмена в роторных испарителях является величина коэффициента теплоотдачи. Для его определения различные авторы используют разные методы и приемы, например, в работах [10, 12] критериальные уравнения, в общем виде описывающие процессы теплообмена при кипении жидкости в пленке в роторном пленочном аппарате, имеют вид:

$$Nu = f(Re_n, Re_u, Pr, We, Fr, K_{nl}, K_\phi, Ga). \quad (1.2)$$

Изучая процесс теплообмена в роторном пленочно-струйном испарителе при концентрировании растворов пектиновых экстрактов, С.А. Лиссер [49] получил уравнение для расчета теплоотдачи вида:

$$Nu = \eta_{\max}^{\frac{6}{7}} \left[ \frac{0,4Pr}{\ln(0,036\eta_{\max}) + 2\ln\left(\frac{1+5Pr}{1+0,2Pr}\right) + 0,63Pr^{\frac{3}{4}}f(Pr)} \right]. \quad (1.3)$$

Г.Д. Кавецкий и Б.В. Васильев [34] предлагают для определения коэффициента теплоотдачи в роторно – пленочном выпарном аппарате следующую обобщенную зависимость:

$$Nu = 0,65Re_n^{0,25}Re_u^{0,43}Pr^{0,3}z^{0,33}. \quad (1.4)$$

В работе [106], при исследовании процесса концентрирования экстрактов красной рябины и красной смородины в роторном распылительном испарителе, для описания процесса теплообмена было получено критериальное уравнение вида

$$Nu = 0,0075Pe_u^{1,315} \cdot Re_n^{-0,405} \cdot Fr^{0,69} \cdot K^{-0,39} \cdot (Z \cdot We)^{-0,5} \cdot \left(\frac{d_K}{D}\right)^{0,476}. \quad (1.5)$$

Более подробный обзор публикаций, посвященных исследованию процесса теплообмена в роторных выпарных аппаратах, представлен автором в работе [93].

Пути повышения эффективности выпарных аппаратов различны. К ним относятся: интенсификация рабочих процессов на контактных элементах установок; снижение расходов энергии на выпаривание; снижение капитальных затрат; улучшение эксплуатационных характеристик установок; утилизация вто-

ричных энергоресурсов при выпаривании; комбинирование выпаривания с другими методами концентрирования растворов; комбинирование процессов выпаривания с другими технологическими процессами [30, 100]. Целесообразность тех или иных мероприятий, повышающих эффективность выпарных установок, определяется в результате технико-экономической оценки.

Интенсифицировать теплоотдачу в РРИ (в случае парового и жидкого теплоносителей) можно не только за счет организации оптимальных гидродинамических режимов протекания теплообменных процессов внутри самого аппарата, но и за счет интенсификации отдачи тепла от теплоносителя к поверхностям нагрева. Достигнуть этого можно путем повышения температуры или скорости потока теплоносителя, применением в качестве его перегретого водяного пара, изменением режима течения теплоносителя с ламинарного на турбулентный [100, 103, 104, 117].

Интенсификация теплообмена в последнем случае объясняется следующим образом. При возникновении в потоке турбулентного течения микроскопические элементы жидкости внутри него начинают совершать различные, внешне беспорядочные движения. В этом случае происходит передача количества движения от одного элемента жидкости к другому и возникает добавочное касательное напряжение в дополнение к касательному напряжению за счет молекулярных взаимодействий. При наличии теплообмена между стенкой и жидкостью возникает градиент температуры (или энтальпии) поперек потока, и отдельные элементы жидкости при своем движении попадают в области, где их средняя температура изменяется. Такое движение порождает добавочную теплопередачу в дополнение к теплопередаче за счет молекулярной теплопроводности [5, 61, 108, 125, 129, 131].

Следует отметить, что способ интенсификации теплообмена в испарителе за счет турбулизации потока теплоносителя представляется наиболее оптимальным с точки зрения затратности его реализации. Этим можно объяснить интерес ученых к данной проблеме. Например, в работе [35] проведено сравнение каналов, имеющих устройства искусственной турбулизации с гладкими каналами, имеющими те же геометрические параметры. Решение данной задачи

позволило получить неравенство вида

$$\left(\frac{Nu}{Nu_{zл}}\right)^2 > \frac{\xi}{\xi_{zл}} \left(\frac{Re}{Re_{zл}}\right)^3 \left(\frac{T_{W_{zл}} - T_{b_{zл}}}{T_W - T_b}\right)^2. \quad (1.6)$$

Наиболее простым представляется способ турбулизации потока жидкости струей инертного газа (чаще воздуха), вдуваемой в него [1]. Данный способ не требует каких-либо серьезных изменений в конструкции теплообменного аппарата при его модернизации, потребление энергии на инжектирование струи воздуха в поток жидкости незначительно.

Однако, несмотря на кажущуюся простоту способа турбулизации потока жидкости газом (воздухом), объем публикаций на эту тему в доступной литературе довольно скуден. В результате проведенного поиска информации удалось обнаружить лишь несколько работ, посвященных исследованию процессов, происходящих в двухфазных газожидкостных системах [1, 45, 50, 77].

Так, в работе [77] исследовался механизм уноса газа свободными струями жидкости в кожухотрубных струйно-инжекционных аппаратах. Была получена зависимость:

$$\frac{Q_{\Gamma}}{Q_{Ж}} = 3,8 Re_{D_3}^{-0,06} Re_H^{-0,03}. \quad (1.7)$$

В работе [1] изучался пузырьковый шлейф газа, выпускаемого в покоящуюся жидкость в режиме непрерывного истечения газовой струи с ее распадом на пузыри вблизи от сопла. Определена средняя по площади струи величина турбулентности:

$$\bar{E}_s = \frac{\Delta U_s}{U_0} + 1,21 \left( \frac{C_g}{C_g + \rho_g / \rho_W} \right)^{\frac{2}{3}}. \quad (1.8)$$

Изучению закономерностей теплоотдачи и эффекта оттеснения (разрушения пузырькового режима) при кипении и барботаже жидкостей газом посвящена работа [45]. Получена зависимость для определения коэффициента теплоотдачи при барботаже жидкости газом и при кипении разнообразных жидкостей в широком диапазоне давлений:

$$Nu = 1,5 \cdot 10^{-3} (pU''c'_p / g\lambda')^{2/3} . \quad (1.9)$$

Более подробный обзор материалов, посвященных интенсификации теплообмена, представлен автором в работе [93].

Каких-либо данных по исследованию зависимости степени турбулизации потока теплоносителя от режимов инжектирования в него струи воздуха с целью интенсификации теплообмена между теплоносителем и упариваемым продуктом в РРИ не найдено. Проведенный анализ свидетельствует о том, что для интенсификации процесса концентрирования пищевых продуктов в РРИ необходимо выполнить исследование теплообмена в аппарате, определить влияние основных факторов (таких как расход воздуха и воды в греющей рубашке РРИ, начальных температур воздуха и воды и др.) на интенсивность процесса теплообмена, обобщить полученные результаты и получить зависимости, описывающие процесс теплообмена в РРИ. А также на основании анализа полученных данных сформулировать рекомендации по применению РРИ для получения концентрированных экстрактов боярышника кроваво-красного и калины обыкновенной.

### **1.3 Характеристика и свойства экстрактов из ягод боярышника кроваво-красного и калины обыкновенной**

Экстракты представляют собой жидкие растворы с различной концентрацией сахаров, минеральных веществ, органических кислот, биологически активных компонентов в водно-спиртовом экстрагенте или воде [27, 34, 90]. Технология переработки плодово-ягодного сырья в концентрированные экстракты содержит стадии экстрагирования, деалкоголизации, концентрирования и др. [8, 31, 32, 34, 90, 106]. Процессы, протекающие на каждой из этих стадий, относятся к тепло- и массообменным. В результате в обрабатываемых продуктах изменяются физико-химические и теплофизические свойства. Поэтому большое значение имеет экспериментальное проведение исследований физико-химических свойств и теплофизических характеристик. Эти данные необходимы при выборе рациональных и оптимальных режимов проведения процессов, при расчете теплообмена в РРИ,

при определении режимных и конструктивных параметров технологического оборудования и т.п. Опубликованных данных о свойствах экстрактов боярышника и калины в доступной литературе не найдено.

### **1.3.1 Химический состав и питательная ценность плодово-ягодного сырья и экстрактов**

Пищевые продукты с использованием плодово-ягодных наполнителей и добавок обеспечивают высокий уровень сбалансированности состава, содержат биологически активные микрокомпоненты, обладают высокими вкусовыми качествами [37, 43, 84, 106]. Использование местного плодово-ягодного сырья, которым богаты регионы России, в различных отраслях пищевой промышленности позволяет решить ряд насущных проблем: расширить сырьевую базу и ассортимент выпускаемой продукции, повысить биологическую ценность продуктов питания, снизить затраты на перевозку сырья, а следовательно, и себестоимость продуктов. В условиях Западной Сибири хорошо районированы ягодные культуры боярышника кроваво-красного, калины обыкновенной [68, 71] и другие, они дают устойчивые высокие урожаи, отличаются высоким содержанием важнейших биологически активных веществ, обладают хорошими вкусовыми достоинствами [24, 42, 43, 59, 73, 84, 113].

В данной работе будут рассмотрены вопросы, связанные с концентрированием экстрактов боярышника кроваво-красного и калины обыкновенной. Плоды этих ягодных культур содержат целый ряд полезных для организма человека веществ [17, 32, 37, 43, 46, 68, 119].

Дикорастущие плоды и ягоды издавна используются в свежем и переработанном виде в питании человека. Пищевая ценность ягод связана с их химическим составом. Многие растения обладают также лечебными свойствами [17, 24, 32, 42, 43, 46, 47, 48, 63, 68, 69, 119].

Данные о химическом составе и энергетической ценности плодов боярышника кроваво-красного и калины обыкновенной приведены в приложении П 1.



Витамины содержатся в плодах и ягодах дикорастущих растений в малых дозах, но именно в этих малых дозах они необходимы для нормальной жизнедеятельности человека. В концепции сбалансированного питания витамины рассматриваются как эффективное профилактическое средство против токсического действия малых доз химических веществ, ионизирующих излучений и других нежелательных воздействий на организм человека [69, 119].

Содержание витаминов и фенольных соединений в плодах боярышника кроваво-красного и калины обыкновенной показано в приложении П 2.

Минеральные вещества в дикорастущих плодах и ягодах находятся в легкоусвояемой форме. Они играют огромную роль в жизнедеятельности человека и животных, являясь важной составной частью крови, лимфы, пищеварительных соков и других жидкостей организма [17, 24, 42, 43, 48, 63, 85, 113]. Данные, характеризующие содержание минеральных веществ в плодах боярышника кроваво-красного и калины обыкновенной, приведены в приложении П 3.

Более полные данные о химическом составе и пищевой ценности, содержании витаминов и минеральных веществ в ягодах боярышника кроваво-красного и калины обыкновенной, полученные в результате литературного обзора, представлены автором в работе [20].

Проанализировав данные, полученные в результате обзора литературы, можно сделать следующие заключения:

- дикорастущие плодово-ягодные культуры боярышника кроваво-красного и калины обыкновенной широко районированы в условиях Западной Сибири и дают стабильные ежегодные урожаи;

- энергетическая ценность и содержание для организма человека полезных веществ, таких как углеводы, органические кислоты, дубильные вещества, витамины, фенольные соединения и микроэлементы, в плодах боярышника кроваво-красного и калины обыкновенной довольно высокие;

- продукты, изготовленные из плодов боярышника кроваво-красного и калины обыкновенной, издревле употреблялись в пищу и в лечебных целях народами, населявшими территорию Западной Сибири.

Это позволяет говорить о целесообразности использования плодов боярышника кроваво-красного и калины обыкновенной в качестве сырья для изготовления пищевых добавок и создания продукции повышенной пищевой ценности в различных отраслях пищевой промышленности.

Но плоды боярышника кроваво-красного и калины обыкновенной содержат почти 90 % влаги, нестойки при хранении и являются хорошим субстратом для развития плесени, дрожжей и многих других микроорганизмов. Поэтому для получения из них полуфабрикатов плоды необходимо качественно перерабатывать.

Широкое применение в молочной, пивобезалкогольной, ликеро-водочной и других отраслях пищевой промышленности нашли концентрированные плодово-ягодные экстракты [8, 23, 113]. Они содержат большое количество биологически активных веществ и отличаются простотой внесения в продукты.

Для получения концентрированных экстрактов требуется осуществить деалкоголизацию и упаривание морсов, путем удаления растворителя испарением при кипении жидкости [34]. Главным качественным требованием для готовых пищевых продуктов является минимальное химическое изменение состава естественного продукта. Но плодовые соки имеют различную термоустойчивость. Так, качество соков цитрусовых не ухудшается при нагревании до 26 °С, яблочных, ягодных и ананасовых – до 55 °С, а депектинированный виноградный сок выдерживает температуру до 100 °С. Поэтому выпаривание обычно ведут при разрежении, соответствующем температуре кипения от 55 до 60 °С.

Актуальной задачей является разработка рациональных технологических режимов переработки сырья из плодов боярышника кроваво-красного и калины обыкновенной, с целью наиболее полного извлечения из них и сохранения полезных веществ.

### **1.3.2 Физические и теплофизические свойства экстрактов**

Для анализа процессов теплообмена, происходящих в РРИ при получении концентрированных экстрактов, в процессе деалкоголизации и концентрирова-

ния, необходимо знать физические и теплофизические свойства экстрактов.

Физические и теплофизические свойства для различных пищевых продуктов, в зависимости от температуры, давления и других параметров, приводятся в справочной литературе [16, 36, 56, 118]. Данные для свойств экстрактов из плодов боярышника кроваво-красного и калины обыкновенной в литературе отсутствуют.

К физическим свойствам относятся такие, как плотность, вязкость, поверхностное натяжение и другие [2, 21, 34, 78, 105].

Экспериментальное исследование физико-химических свойств экстрактов из ягод боярышника кроваво-красного и калины обыкновенной проведено в работе [94]. После обработки результатов экспериментов на ЭВМ в среде статистического пакета «STATISTICA-6.0» были получены эмпирические зависимости, описывающие физико-химические свойства экстрактов.

Для экстрактов из ягод боярышника кроваво-красного уравнение множественной регрессии, описывающее распределение плотности экстрактов  $\rho$  (кг/м<sup>3</sup>) в зависимости от содержания в них сухих веществ ( $C_{св}$ ), спирта ( $C_{сп}$ ) и температуры ( $t$ ), имеет вид:

$$\rho_B = 1010,826 + 4,593 \cdot C_{св} - 3,307 \cdot C_{сп} - 0,543 \cdot t, \quad R = 98,8\%, \quad (1.10)$$

где  $R$  – коэффициент множественной корреляции, который показывает, что модель приспособленно объясняет 98,8% изменения плотности.

Для динамической вязкости  $\mu$ , (мПа·с):

$$\mu_B = 2,436115 - \exp(4,02452 - 0,147894 \cdot C_{св} - 0,004231 \cdot C_{сп} + 0,051284 \cdot t), \quad R = 99,105\%. \quad (1.11)$$

Для поверхностного натяжения  $\sigma$ , (Н/м):

$$\sigma_B = 0,067176 - 0,000227 \cdot C_{св} - 0,00038 \cdot C_{сп} - 0,000207 \cdot t, \quad R = 98,52\%. \quad (1.12)$$

Для экстрактов из ягод калины обыкновенной:

$$\rho_K = 994,44 + 4,9517 \cdot C_{св} - 3,083 \cdot C_{сп} - 0,4581 \cdot t, \text{ кг/м}^3, \quad R = 99,53\%; \quad (1.13)$$

$$\mu_K = 2,034486 - \exp(0,500022 - 0,083102 \cdot C_{св} + 0,019041 \cdot C_{сп} + 0,048829 \cdot t), \text{ мПа}\cdot\text{с}, \quad (1.14)$$

$R = 99,215\%$ ;

$$\sigma_K = 0,053588 - 0,000243 \cdot C_{св} - 0,000212 \cdot C_{сп} - 0,000266 \cdot t, \text{ Н/м}, \quad R = 94,12\%. \quad (1.15)$$

К теплофизическим свойствам относятся теплоемкость, теплопроводность, температуропроводность и другие [33, 34, 102, 118].

Теплоемкость тела характеризует теплоаккумулирующие свойства вещества, интенсивность изменения температуры тела при его нагревании или охлаждении [9]. В инженерной практике применяется удельная теплоемкость при постоянном давлении  $c_p$ , – теплоемкость единицы массы вещества, поэтому в дальнейшем под удельной теплоемкостью –  $c$  следует понимать  $c_p$ . Теплоемкость жидкости мало изменяется с изменением давления, в то же время она может возрастать и убывать с ростом температуры, концентрации сухих веществ [16, 34]. Экспериментальные значения удельной теплоемкости некоторых пищевых продуктов приводятся в справочниках в виде таблиц и эмпирических формул [9, 34, 118,].

Так, удельная теплоемкость томатопродуктов в Дж/(кг·К) рассчитывается по формуле [34]:

$$c=4228,7-20,9 \cdot C_{CB}-10,88 \cdot t. \quad (1.16)$$

Уравнения регрессии для расчета удельной теплоемкости  $c$  (кДж/(кг·К)) экстрактов черноплодной рябины и черной смородины имеют вид соответственно [60]:

$$c_{ч.р}=3740,543 - 16,815 \cdot C_{CB} + 6,708 \cdot C_{СП} + 0,998 \cdot t, \quad (1.17)$$

$$c_{ч.с}=3879,536 - 20,244 \cdot C_{CB} + 4,170 \cdot C_{СП} + 0,977 \cdot t. \quad (1.18)$$

Для красной рябины и красной смородины [106]:

$$c_{к.р}=4159,156-22,249 \cdot C_{CB}-2,715 \cdot C_{СП}+3,807 \cdot t, \quad (1.19)$$

$$c_{к.с}=4256,672-25,275 \cdot C_{CB}-1,132 \cdot C_{СП}+2,313 \cdot t. \quad (1.20)$$

Механизм распространения теплоты в жидкостях теоретически можно представить как перенос энергии путем нестойких упругих колебаний. На основании этой теории была получена формула для определения коэффициента теплопроводности [33, 34]:

$$\lambda = A \cdot \frac{c_p \cdot \rho^{4/3}}{m^{1/3}}, \quad (1.21)$$

где  $m$  – молекулярная масса;  $A$  – коэффициент, зависящий от степени ассоциации жидкостей, для воды:  $A = 3,58 \cdot 10^{-8}$ .

Так как жидкости могут иметь различную температуру, а при наличии теплообмена и в самом веществе температура будет распределена неравномерно, то в первую очередь важно знать зависимость коэффициента теплопроводности от температуры. Опыты показывают, что для многих веществ с достаточной для практики точностью зависимость коэффициента теплопроводности от температуры можно принять линейной [33]:

$$\lambda = \lambda_0 [1 + b \cdot (t - t_0)], \quad (1.22)$$

где  $\lambda_0$  – значение коэффициента теплопроводности при температуре  $t_0$ ;  $b$  – постоянная, определяемая опытным путем.

Теплопроводность фруктовых соков, сиропов определяют по формуле [34]:

$$\lambda = \lambda_{20} + 0,00068 \cdot (t - 20), \quad (1.23)$$

где  $\lambda_{20} = 0,593 - 0,025 \cdot C_{CB}^{0,53}$  – теплопроводность соков при температуре  $t=20$  °С.

Теплопроводность растворов сахарозы при температурах до 80 °С при  $0 < C_{CB} < 65\%$  [34]:

$$\lambda = (1 - 5,479 \cdot 10^{-3} \cdot C_{CB}) \cdot (0,5686 + 1,514 \cdot 10^{-3} \cdot t - 2,2 \cdot 10^{-6} \cdot t^2). \quad (1.24)$$

Для яблочного сока коэффициент теплопроводности в кКал/(м·ч·К) [118]:

$$\lambda = \left[ 0,154 + 0,16 \cdot \left( \frac{C_{CB}}{100} \right) - 0,32 \cdot \left( \frac{C_{CB}}{100} \right)^2 \right] \cdot \frac{1,16 \cdot t}{100} + 0,254 \cdot \left( \frac{C_{CB}}{100} \right)^{-0,225}. \quad (1.25)$$

Уравнения регрессии для коэффициентов теплопроводности  $\lambda$  (Вт/(м·К)) экстрактов черноплодно-рябинового и черной смородины имеют вид [60]:

$$\lambda_{ч.р} = 0,162177 - 0,001973 \cdot C_{CB} - 0,002483 \cdot C_{СП} + 0,01095 \cdot t, \quad (1.26)$$

$$\lambda_{ч.с} = 0,173349 - 0,0043186 \cdot C_{CB} - 0,0033458 \cdot C_{СП} + 0,00128824 \cdot t. \quad (1.27)$$

Для красной рябины и красной смородины [106]:

$$\lambda_{к.р} = (49,6047 - 0,258 \cdot C_{CB} - 0,3074 \cdot C_{СП} + 0,0811 \cdot t) \cdot 10^{-2}, \quad (1.28)$$

$$\lambda_{к.с} = (52,8339 - 0,2846 \cdot C_{CB} - 0,3533 \cdot C_{СП} + 0,0896 \cdot t) \cdot 10^{-2}. \quad (1.29)$$

Коэффициент температуропроводности –  $a$  (м<sup>2</sup>/с) является основным параметром при неустановившемся режиме и характеризует теплоинерционные свойства тела, скорость изменения температуры в различных точках темпера-

турного поля. Коэффициент температуропроводности связан с коэффициентами теплопроводности и теплоемкости и может быть рассчитан по формуле [34]  $a = \lambda / (c \cdot \rho)$ . Это отношение можно рассматривать как меру скорости изменения температуры единицы объема тела при прохождении через него теплового потока, пропорционального  $\lambda$ .

Результаты исследований коэффициента температуропроводности пищевых продуктов (яблочного мусса, томатов и др.), проведенные Роделем [16], позволили рекомендовать обобщенную формулу для его определения в зависимости от массовой доли влаги –  $W$  и температуры:

$$a \cdot 10^8 = 8,83 + W \cdot K, \quad (1.30)$$

где  $K$  – коэффициент, зависящий от температуры. В диапазоне температур от 303...333 К он изменяется в пределах 6...7.

Уравнения множественной регрессии для коэффициентов температуропроводности  $a$  ( $\text{м}^2/\text{с}$ ) экстрактов красной рябины и красной смородины имеет вид [106]:

$$a_{к.р} = (117,961 - 0,413 \cdot C_{CB} - 0,567 \cdot C_{СП} + 0,154 \cdot t) \cdot 10^{-9}, \quad (1.31)$$

$$a_{к.с} = (120,074 - 0,0149 \cdot C_{CB}^2 - 0,82 \cdot C_{СП} + 0,215 \cdot t + 0,01095 \cdot C_{CB} \cdot C_{СП}) \cdot 10^{-9}. \quad (1.32)$$

Анализ исследований физических и теплофизических свойств экстрактов показал, что они зависят от температуры, состава (концентрация спирта и сухих веществ), структуры продукта. Данных по физическим и теплофизическим свойствам экстрактов боярышника кроваво-красного и калины обыкновенной в литературе не найдено.

#### 1.4 Выводы по главе

1 Проведенный обзор известных конструкций роторных испарителей показал, что с учетом термолабильности плодово-ягодного сырья процессы dealкоголизации и концентрирования необходимо проводить при невысоких температурах и с минимальной продолжительностью контакта продукта с теплообменной поверхностью. Этим требованиям вполне отвечает выбранная конструкция РРИ [87, 106], которая обеспечивает высокую эффективность проводимых теп-

ло- и массообменных процессов, обладает низким гидравлическим сопротивлением и является перспективным видом оборудования при аппаратурном оформлении процессов концентрирования под вакуумом.

2 Анализ литературных данных показал, что концентрированные экстракты, полученные из плодово-ягодного сырья боярышника кроваво-красного и калины обыкновенной, будут богаты витаминами и другими биологически активными веществами и могут быть использованы в качестве наполнителей, при производстве комбинированных пищевых продуктов. Однако в результате проведенного литературного обзора рекомендаций по использованию экстрактов боярышника и калины не обнаружено, что позволяет говорить о необходимости их разработки.

3 В результате проведенного литературного обзора сведений о теплофизических свойствах экстрактов боярышника кроваво-красного и калины обыкновенной не обнаружено, что предопределяет необходимость их изучения.

4 Возможности РРИ использованы далеко не полностью. На основании данных, полученных в результате литературного обзора, можно сказать о возможности повышения интенсивности теплообмена на контактных элементах РРИ за счет турбулизации потока теплоносителя (воды), прокачиваемого через греющую рубашку, воздухом. Этот способ эффективен, достаточно экономичен и не требует серьезных изменений конструкции РРИ. Но неизученность процесса теплоотдачи при деаэголизации и концентрировании жидких пищевых продуктов от горячего теплоносителя (в условиях турбулизации последнего воздухом) к поверхности теплообмена РРИ, отсутствие данных о рациональных режимах работы РРИ и обоснованных методов расчета не позволяют в полной мере реализовать преимущество этого способа на практике.

## **ГЛАВА 2 ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭКСТРАКТОВ ИЗ ЯГОД БОЯРЫШНИКА КРОВАВО-КРАСНОГО И КАЛИНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ**

Плодово-ягодные экстракты (в том числе и концентрированные) по структурным характеристикам могут быть отнесены к группе гомогенных микроскопических веществ, т.е. их можно условно рассматривать как полидисперсные системы, в которых влага является компонентом со свойствами, близкими к свойствам свободной влаги [90, 105, 106]. Количественное содержание в экстрактах солей, сахаров, кислот, спирта и других веществ определяет их теплофизические свойства (ТФС), и следовательно, изменение концентрации сухих веществ и спирта в процессе деалкоголизации и концентрирования экстрактов вызывает значительные изменения ТФС [16, 88, 89, 106]. В данной главе решаются вопросы экспериментального исследования теплофизических свойств экстрактов из ягод боярышника кроваво-красного и калины обыкновенной.

### **2.1 Методы и порядок проведения экспериментальных исследований**

Теплофизические свойства различных пищевых продуктов, в частности экстрактов из плодово-ягодного сырья, зависят от химического состава, уровня энергетического состояния молекул, микроструктуры, предварительной термообработки, температуры, содержания в экстрактах растворителя и сухих веществ.

Методы исследования ТФС различаются формой исследуемых образцов, способом нагрева, режимом изменения температуры образцов во времени. По характеру поведения во времени температурного поля методы исследования можно разделить на стационарные и нестационарные [56].

Для исследования теплопроводности жидкостей  $\lambda$  широкое применение нашел метод неограниченного плоского слоя [2, 33, 56]. Исследуемому веществу придается форма пластины. Для создания температурного перепада по



толщине пластины одна поверхность ее нагревается, а другая охлаждается. С целью получения одномерного теплового потока при выборе размеров плоского образца для тел с плохой проводимостью теплоты ( $\lambda \leq 2,3$  Вт/(м·К)) стремятся выполнить следующее условие [56]:

$$h \leq \left( \frac{1}{7} \div \frac{1}{10} \right) D, \quad (2.1)$$

где  $h$  - толщина пластины, мм;  $D$  - сторона квадратной пластины, мм.

Основная сложность при исследовании  $\lambda$  жидкостей состоит в возможности появления конвективного переноса теплоты при создании разности температур в слое исследуемой жидкости. Для устранения этого явления градиент температур должен быть направлен вдоль поля гравитации (тепловой поток нужно направить сверху вниз), а изотермические поверхности должны быть горизонтальными [2, 16].

Для определения теплопроводности жидкостей, как наиболее простой, чаще используется сравнительный метод Христиансена [16]. Метод основан на сравнении образца материала  $X$  с эталоном  $N$ , обладающим хорошо изученной и не подвергающейся изменениям теплопроводностью. Идея метода состоит в следующем. Образцам материалов придают форму пластин с одинаковыми основаниями с толщинами  $h_x$  и  $h_N$ , образцы плотно прижимают друг к другу, к плоскому нагревателю и плоской (охлаждаемой водой или воздухом комнаты) металлической плите. Тепловой поток, создаваемый нагревателем, проходит через обе пластины. Если  $T_1$  – температура на поверхности нагрева,  $T_2$  – температура в плоскости соприкосновения пластин, а  $T_3$  – температура на холодной стороне этой двухсоставной пластины, то плотность теплового потока можно определить по формуле:

$$q = \frac{T_1 - T_2}{R_x} = \frac{T_2 - T_3}{R_N}, \quad (2.2)$$

откуда получим:

$$R_x = \frac{h_x}{\lambda_x} = \frac{T_1 - T_2}{T_2 - T_3} \cdot R_N, \text{ или}$$

$$\lambda_x = \frac{T_2 - T_3}{T_1 - T_2} \cdot \lambda_N \cdot \frac{h_x}{h_N}, \quad (2.3)$$

где  $R_x$ ,  $R_N$  и  $\lambda_x$ ,  $\lambda_N$  – соответственно тепловые сопротивления и коэффициенты теплопроводности пластин.

Так как  $\lambda_N$  известна, то для определения  $\lambda_x$ , достаточно измерить температурные разности:  $T_1 - T_2$  и  $T_2 - T_3$ , зная тепловой поток нет необходимости.

На рисунке 2.1 представлена схема экспериментальной установки по исследованию теплопроводности экстрактов. В теплоизолированный корпус - 1 помещена измерительная ячейка, состоящая из верхнего - 4 и нижнего - 5 резервуаров в форме прямоугольных пластин с одинаковой толщиной. Для создания требуемой толщины использованы фторопластовые прокладки, калиброванные по толщине, равной 10 мм. Измерительная ячейка (верхний резервуар) заполняется исследуемым экстрактом с заданными концентрациями сухих веществ и спирта, а нижний резервуар заполняется эталонной жидкостью – химически чистым глицерином, теплопроводность которого в заданном диапазоне температур постоянна [9, 64]. К верхнему резервуару плотно прижимается нагреватель – 3, выполненный в виде металлической прямоугольной коробки, через которую, с заданной температурой и расходом 12 л/мин., прокачивается греющий агент. Греющий агент подается от ультратермостата модели IP – 227, с точностью настройки температуры на выходе из ультратермостата  $\pm 0,1$  °С. К нижнему резервуару плотно прижимается холодильник – 2, по конструкции аналогичный нагревателю. К холодильнику подводится холодная вода с постоянным расходом. Регулирование температуры в процессе эксперимента производится с помощью ультратермостата. Измерение температуры на горячей и холодной сторонах двухсоставной пластины и в месте их соприкосновения производится хромель-копелевыми термопарами – 8.

Один спай термопар зачеканен по центру пластин, а другой находится в сосуде Дьюара – 10. ТермоЭДС каждой термопары измеряется цифровым вольтметром – 6 модели Щ68003.

Внутренние размеры резервуаров выбирали так, чтобы выполнялось условие (2.1): толщина – 10 мм; длина – 100 мм; ширина – 70 мм.

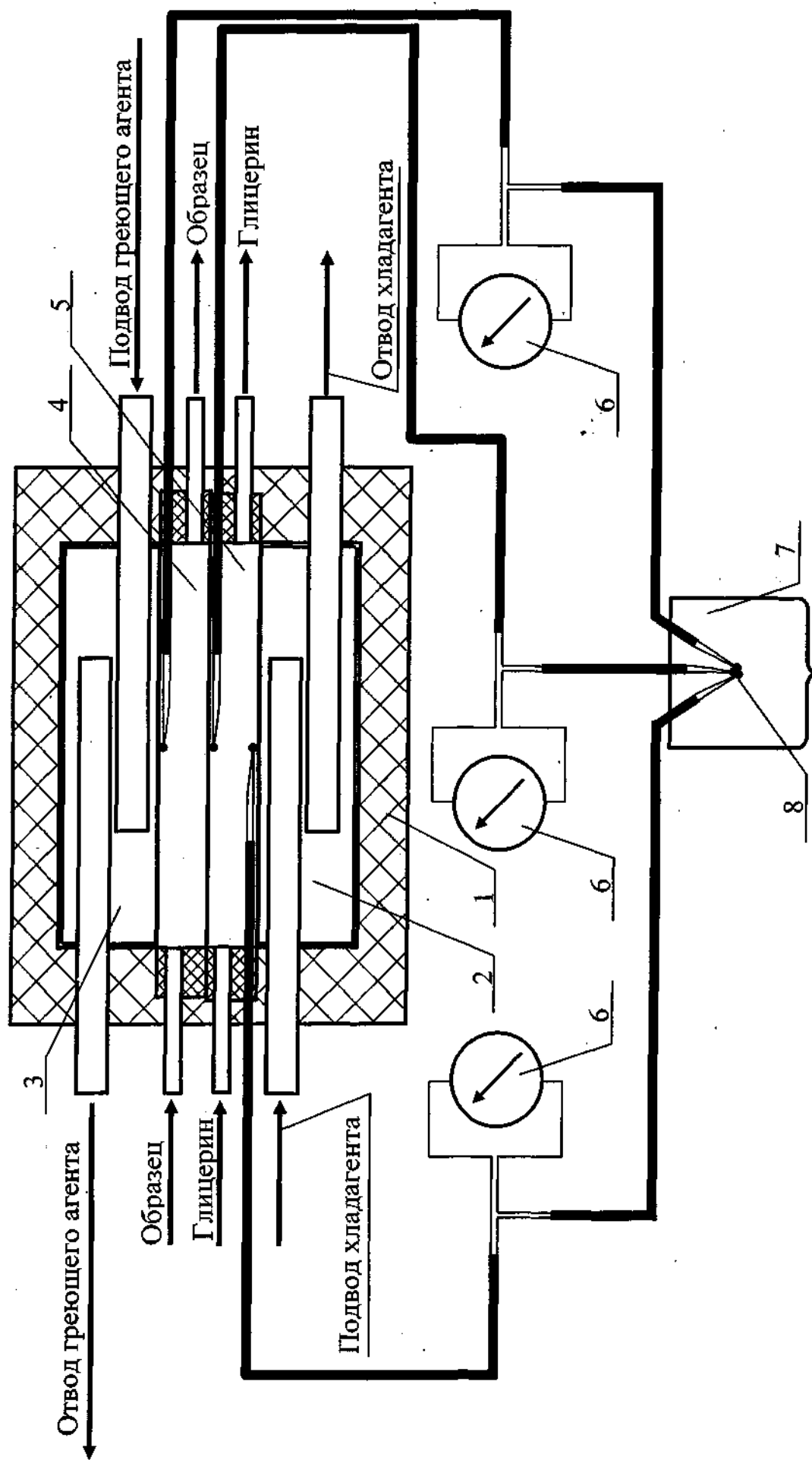


Рисунок 2.1 – Схема лабораторной установки для исследования теплопроводности экстрактов

Однако, чтобы минимизировать погрешность, связанную с невыполнением условия одномерности температурного поля, была проведена серия экспериментов на эталонной жидкости (дистиллированная вода), теплопроводность которой известна [64, 118]. Результаты проведенных экспериментов представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1

**Результаты экспериментов по определению постоянной прибора для исследования теплопроводности**

$\lambda_{\text{воды}}$ (табличное значение) Вт/(м К)	$\lambda_{\text{воды}}$ (экспериментальное значение) Вт/(м К)	$\varepsilon_i = \frac{\lambda_{\text{воды (табл.)}}}{\lambda_{\text{воды (экс.)}}$	$\bar{\varepsilon}$	$\varepsilon_i - \bar{\varepsilon}$
0,60842	0,57603	1,056	1,0512	0,0048
	0,56603	1,075		0,0238
	0,5997	1,015		-0,0362
	0,5881	1,035		-0,0162
	0,56603	1,075		0,0238

Данные исследования проводились с целью определения поправочного коэффициента (постоянной прибора)  $\varepsilon = \frac{\lambda_{\text{э.т}}}{\lambda_{\text{э}}}$ , где  $\lambda_{\text{э.т}}$  – табличное значение коэффициента теплопроводности эталонной жидкости при данной температуре;  $\lambda_{\text{э}}$  – значение коэффициента теплопроводности эталонной жидкости при той же температуре, полученное экспериментально. В результате было получено среднее значение поправочного коэффициента  $\bar{\varepsilon} = 1,0512$ .

Таким образом, окончательная расчетная формула имеет вид:

$$\lambda_x = \frac{T_2 - T_3}{T_1 - T_3} \cdot \lambda_N \cdot \frac{h_X}{h_N} \cdot \bar{\varepsilon}, \quad (2.4)$$

После установления стационарного режима, характеризующегося неизменными показаниями термоЭДС, определяется температура в трёх точках: на горячей –  $T_1$ , холодной –  $T_3$  сторонах измерительной ячейки и в плоскости их соприкосновения –  $T_2$ . Опыты проводились в пяти повторениях, с учётом рандомизации во времени. Измерения проводили при средней температуре образцов в диапазоне от 20 до 48 °С, с шагом, равным 7 °С, и рассчитывали теплопроводность по уравнению (2.4).

Экспериментально полученные значения коэффициентов теплопроводности экстрактов боярышника кроваво-красного и калины обыкновенной приведены в приложениях П 4, П 5.

Для исследования теплоемкости жидкости широкое применение нашли калориметрические методы. К ним относятся метод протока, метод смешения, при котором предварительно нагретый образец материала охлаждается в калориметре, сравнительный метод микрокалориметра, основанный на регулярном тепловом режиме, калориметрический метод [56]. Для определения теплоемкости экстрактов был выбран калориметрический метод, который был использован в работах [16, 106] для определения удельной теплоемкости экстрактов. Схема установки изображена на рисунке 2.2.

Основным элементом установки является калориметрический сосуд – сосуд Дьюара, с наружным диаметром  $d = (50 \pm 2 \text{ мм})$  и высотой  $h = (100 \pm 2 \text{ мм})$ . Исследуемый экстракт объемом 100 мл охлаждался до  $8 \div 10 \text{ °С}$ , затем взвешивался на лабораторных электронных весах модели MW-150 с точностью измерения  $\pm 0,005 \text{ г}$  и помещался в калориметрический сосуд – 1. Сосуд закрывается термоизолированной пробкой – 3, на которой закреплены электрическая мешалка – 2, необходимая для выравнивания температурного поля по всему объему исследуемого образца экстракта, ртутный термометр TGL 11998 – 4 и нагреватель – 8, величина напряжения на котором регулировалась автотрансформатором – 6. Для получения устойчивого напряжения, подаваемого к нагревателю, перед автотрансформатором установлен стабилизатор напряжения СТ-

200 – 7. Измерения производились в температурном диапазоне от 13 до 48 °С, с интервалом роста температуры равном 7 °С.

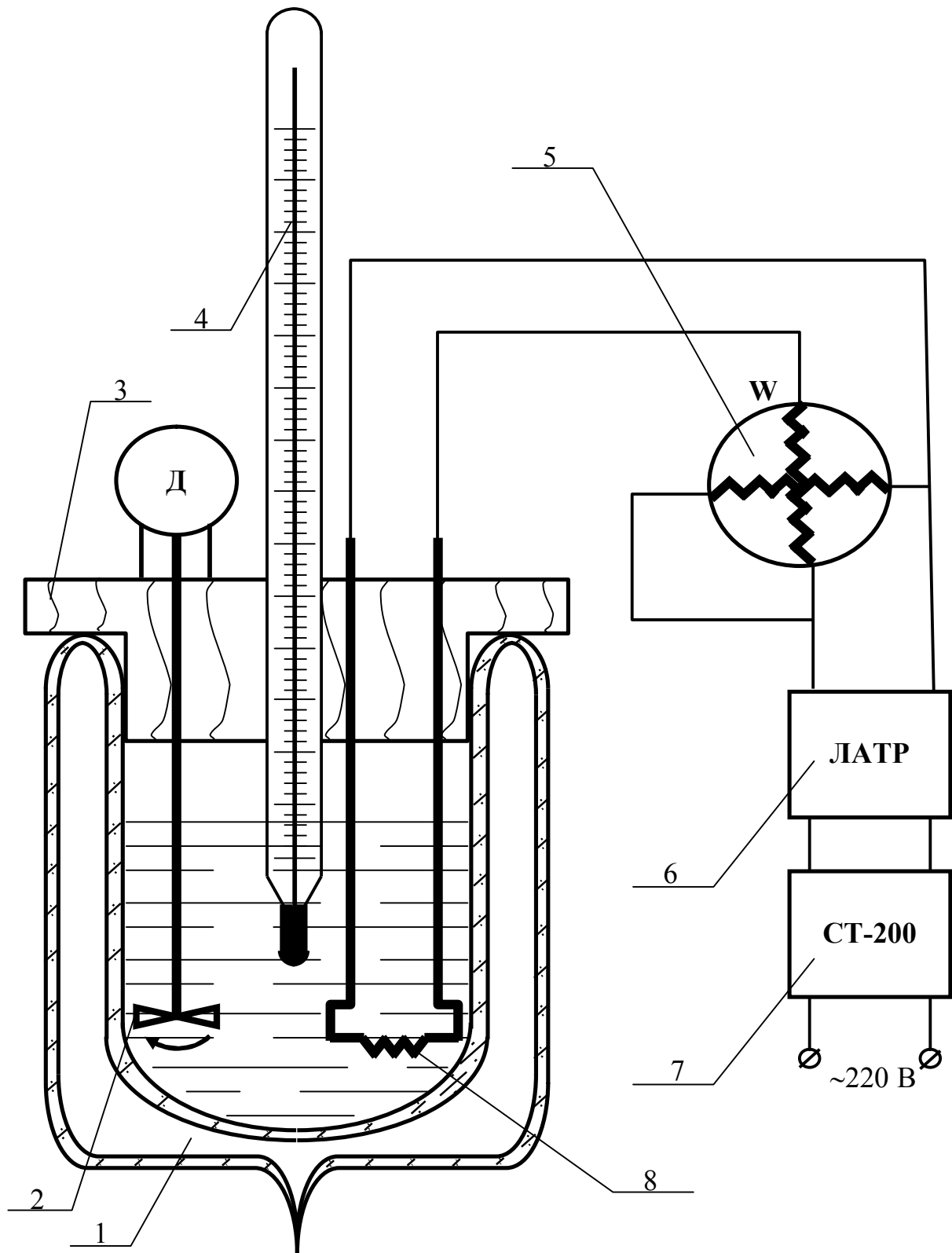


Рисунок 2.2 – Схема лабораторной установки для исследования теплоемкости экстрактов

После подачи напряжения на нагреватель производилось визуальное наблюдение за ростом температуры исследуемого образца. Время прохождения температурных интервалов от начальной температуры до конечной измерялось двумя электронными секундомерами с разрешающей способностью  $\pm 0,01$  с. Измерение электрической мощности, потребляемой нагревателем, производили ваттметром Д 50041 – 5, класса точности 0,2. Температура в процессе нагревания измерялась ртутным термометром TGL 11998 – 4 с ценой деления  $0,1$  °С.

Подведенное количество теплоты за период времени  $\tau$  к исследуемому экстракту можно рассчитать по формуле:

$$Q = m \cdot c \cdot (T_2 - T_1), \quad (2.5)$$

где  $m$  - масса образца экстракта,  $c$  – теплоемкость экстракта,  $T_1$  и  $T_2$  - начальная и конечная температуры экстракта.

Из уравнения (2.5) можно рассчитать теплоемкость экстракта:

$$c = \frac{Q}{m \cdot (T_2 - T_1)}. \quad (2.6)$$

Подведенное количество теплоты рассчитывается по электрической мощности нагревателя –  $Q_{эл} = N \cdot \tau$ , где  $N$  – измеренная электрическая мощность (Вт);  $\tau$  - время прохождения температурного интервала от начальной температуры до конечной (с).

Количество теплоты, выделенное нагревательным элементом  $Q_{эл}$ , расходуется на нагревание исследуемого экстракта  $Q$ , нагревание деталей калориметра  $Q_K$  и на тепловые потери в окружающую среду  $Q_O$ .

Поэтому в уравнение (2.6) необходимо ввести поправочный коэффициент  $\varepsilon$ , учитывающий тепловые потери  $Q_K$  и  $Q_O$ . Для этого была проведена серия опытов на эталонных жидкостях (дистиллированная вода и водно-спиртовой раствор  $C_{СП} = 40$  % об.), по результатам которых была определена величина поправочного коэффициента  $\varepsilon$  (постоянной прибора) для каждой температурной точки. Значения поправочного коэффициента, полученные на дистиллированной воде и проверенные на водно-спиртовом растворе, приведены в табл. 2.2.

**Значения постоянной прибора для исследования теплоемкости  
на контрольных точках температурного диапазона**

Температура $T$ , °С	Поправочный коэффициент $\varepsilon$
20	0,040608
27	0,037468
34	0,034118
41	0,032173
48	0,030555

Величина постоянной прибора определялась как отношение табличного значения коэффициента теплоемкости эталонной жидкости при заданной температуре к значению коэффициента теплоемкости эталонной жидкости при той же температуре, полученному экспериментально, –  $\varepsilon = \frac{c_{э.т.}}{c_э}$ .

Окончательно величину удельной массовой теплоемкости водно-спиртовых растворов и экстрактов  $c$ , кДж/(кг·К), определяли по формуле:

$$c = \frac{N \cdot \tau}{m \cdot (T_2 - T_1)} \cdot \varepsilon. \quad (2.7)$$

Полученные экспериментальные данные по исследованию удельной теплоёмкости боярышника кроваво-красного и калины обыкновенной приведены в приложениях П 4, П 5.

Коэффициент температуропроводности является основной тепловой характеристикой и определяется экспериментально или рассчитывается, если известна теплопроводность, удельная теплоемкость и плотность материала, по формуле [34]:

$$a = \lambda / (c \cdot \rho). \quad (2.8)$$

Значения плотности, для расчета температуропроводности, взяты из работы [94]. Данные по температуропроводности экстрактов боярышника кроваво-красного и калины обыкновенной приведены в приложениях П 4, П 5.



## 2.2 Методика получения образцов экстрактов

В настоящей работе в качестве объектов исследования были использованы экстракты из ягод боярышника кроваво-красного и калины обыкновенной, которые в условиях Западной Сибири хорошо районированы и дают устойчивые урожаи. Как показано в главе 1, данные ягоды отличаются высоким содержанием витаминов, важнейших биологически активных веществ, обладают хорошими вкусовыми достоинствами. Выбор объектов исследований обусловлен тем, что они представляют различные виды ягодных культур, содержащих различные экстрагируемые вещества, отличающиеся как по свойствам, так и по количественному содержанию. Это позволяет выявить основные закономерности деалкоголизации и концентрирования экстрактов, а также дополнить сведения об исследованных ранее процессах и получении концентрированных экстрактов.

Для экспериментов использовались ягоды боярышника кроваво-красного и калины обыкновенной урожая 2005 г., сбор которых проводили в пойменных лесах реки Алей Рубцовского района Алтайского края. Для получения экстрактов использовались высушенные ягоды.

Процесс хранения сушеного плодово-ягодного сырья является наиболее простым и не требует дополнительных затрат (в отличие от хранения ягод в замороженном виде). Сухие плоды и ягоды сохраняются длительное время, не теряя в процессе хранения своих полезных свойств.

Одним из способов консервирования плодово-ягодного сырья является экстракция – извлечение растворимых веществ с помощью растворителя. Для получения экстракта из ягод боярышника кроваво-красного в качестве растворителя использовался 40 % водно-спиртовой раствор. Стационарный способ настаивания, используемый в данной работе, для получения экстрактов состоит из следующих операций [60]:

- сортировка сырья и уборка отходов, дробление сырья, приготовление водно-спиртового раствора требуемой крепости, загрузка сырья в настойные емкости, залив сырья водно-спиртовым раствором, в соотношении одна часть

мезги к одной части водно-спиртового раствора, настаивание при ежедневном перемешивании с периодичностью 1...1,5 часа и контроле за содержанием сухих веществ с помощью рефрактометра РЛ-2;

- после стабилизации содержания сухих веществ в экстракте (4 суток) слив первого настоя в емкости для хранения и измерение полученного объема настоя. Определение концентрации сухих веществ ( $C_{св}$ ) и концентрации спирта ( $C_{сп}$ ) в настое;

- второй залив водой из расчета 1л на 1кг первоначальной массы ягод. Настаивание при ежедневном перемешивании и контроле содержания в экстракте сухих веществ с помощью рефрактометра;

- после стабилизации содержания сухих веществ в экстракте (3 суток) слив и измерение  $C_{св}$  и  $C_{сп}$  в настое второго слива;

- фильтрование полученных экстрактов на лабораторной вакуумной установке.

Экстракт, полученный из ягод боярышника кроваво-красного, после первого настаивания и фильтрования имел концентрацию сухих веществ  $C_{св} = 27,8\%$  масс., концентрацию спирта  $C_{сп} = 29,23\%$  об. После второго настаивания –  $C_{св} = 15\%$  масс.,  $C_{сп} = 5,16\%$  об. Содержание сухих веществ определяли рефрактометром, спирта – пикнометрическим методом [11, 13].

Для получения экстракта из ягод калины обыкновенной в качестве растворителя использовался 40% и 70% водно-спиртовой раствор. Операции получения экстрактов из ягод калины обыкновенной аналогичны операциям получения экстракта из ягод боярышника. После фильтрования полученных экстрактов на лабораторной вакуумной установке были получены экстракты следующего состава: при применении 40%-го водно-спиртового раствора, после первого настаивания –  $C_{св} = 27\%$  масс.,  $C_{сп} = 27,17\%$  об. После второго настаивания –  $C_{св} = 10,2\%$  масс.,  $C_{сп} = 4,67\%$  об. Для экстракта, полученного с применением 70%-го водно-спиртового раствора, после первого настаивания  $C_{св} = 31\%$  масс.,  $C_{сп} = 51,7\%$  об. После второго настаивания –  $C_{св} = 10,8\%$  масс.,  $C_{сп} = 8,69\%$  об. Содержание сухих веществ определяли рефрактометром РЛ-2, спирта – пикнометрическим методом [11, 13].

После получения экстрактов была произведена их деалкоголизация и упаривание на лабораторной вакуумной установке по методике, изложенной в работе [13]. Упаривание проводилось в интервале температур 45...50 °С, с учетом термолабильности экстрактов, до  $C_{св} = 65...70$  %масс., что и определяло граничные условия.

Упаренные экстракты разводились водой и водно-спиртовыми растворами до нужных пропорций. Диапазон содержания сухих веществ в экстрактах был принят в пределах от 5 до 65 % масс. с шагом 15% масс. Содержание спирта в экстрактах изменялось в диапазоне от 0 до 60 % об. с шагом 15 % об. Диапазоны изменения параметров были определены исходя из результатов исследований процессов экстрагирования (стационарный способ настаивания) и концентрирования экстрактов в роторном распылительном испарителе в работах [60, 106].

### 2.3 Анализ результатов исследований теплофизических свойств

Для определения влияния температуры, концентрации сухих растворимых веществ и спирта на теплофизические свойства экстрактов поставлен полнофакторный эксперимент  $2^3$ . Для нахождения более точной картины распределения исследуемых параметров внутри исследуемой области проведены дополнительные эксперименты, в промежуточных точках.

Полученные экспериментальные данные были обработаны на ЭВМ в среде статистического пакета "STATISTICA-6,0", в результате найдены статистические модели, описывающие теплофизические свойства экстрактов.

Для коэффициента теплопроводности  $\lambda_B$  (Вт/(м·К)) экстрактов боярышника кроваво-красного уравнение множественной регрессии имеет вид:

$$\lambda_B = 0,371044 - 0,001108 \cdot C_{св} - 0,002072 \cdot C_{сп} + 0,002594 \cdot t, \quad (2.9)$$

при  $R = 92,8$  %,

где  $R$  – коэффициент множественной корреляции, который показывает, что модель приспособленно объясняет 92,8 % изменчивости коэффициента теплопроводности. Отклонение экспериментальных данных от рассчитанных по уравнению (2.9) не

превышает 5 % в 66 % случаях, 10 % в 88 % случаях и 15 % в 98 % случаях. Максимальное отклонение, которое было выявлено в 2% случаях, составило 16,55 %.

Для коэффициента теплопроводности  $\lambda_K$  (Вт/(м·К)) экстрактов калины обыкновенной уравнение имеет вид:

$$\lambda_K = 0,411525 - 0,002117C_{CB} - 0,002164C_{CP} + 0,001378 \cdot t, \quad (2.10)$$

при  $R = 97,64$  %.

Отклонение экспериментальных данных от рассчитанных по уравнению (2.10) не превышает 5 % в 90 % случаях и 10 % в 10 % случаях. В общей массе максимальное отклонение составило 8,21 %.

Для удельной теплоёмкости  $c_B$  (кДж/(кг·К)) экстрактов боярышника кроваво-красного уравнение множественной регрессии имеет вид:

$$c_B = 3,733037 - 0,019483 \cdot C_{CB} + 0,000411 \cdot C_{CP} + 0,013272 \cdot t, \quad (2.11)$$

при  $R = 96,1$  %,

Отклонение экспериментальных данных от рассчитанных по уравнению (2.11) не превышает 5 % в 96 % случаях, 10 % в 4 % случаях. Максимальное отклонение составило 8,993 %.

Для удельной теплоёмкости  $c_K$  (кДж/(кг·К)) экстрактов калины обыкновенной уравнение множественной регрессии имеет вид:

$$c = 3,841309 - 0,021536 \cdot C_{CB} - 0,000575 \cdot C_{CP} + 0,009836 \cdot t, \quad (2.12)$$

при  $R = 98,36$  %.

Отклонение экспериментальных данных от рассчитанных по уравнению (2.12) не превышает 5 % в 98 % случаях, 10 % в 2 % случаях. Максимальное отклонение составило 6,73 %.

Для коэффициента температуропроводности  $a_B$  (м<sup>2</sup>/с) боярышника кроваво-красного:

$$a_B = (0,097994 - 0,000168 \cdot C_{CB} - 0,000246 \cdot C_{CP} + 0,000381 \cdot t) \cdot 10^{-6}, \quad (2.13)$$

при  $R = 97,16$  %.

Отклонение экспериментальных данных от рассчитанных по уравнению (2.13) не превышает 1,253 %.

Для коэффициента температуропроводности  $a_K$  ( $\text{м}^2/\text{с}$ ) калины обыкновенной:

$$a_K = (0,108502 + 0,00001 \cdot C_{св} - 0,000596 \cdot C_{сп} + 0,000124 \cdot t) \cdot 10^{-6}, \quad (2.14)$$

при  $R = 98,44\%$ .

Отклонение экспериментальных данных от рассчитанных по уравнению (2.14) не превышает 2,876 %.

Результаты статистического анализа ТФС приведены в приложениях П 6, П 7 и на рисунках 2.3 – 2.14.

Для анализа теплопроводности экстрактов рассмотрим частные графические зависимости (рисунки 2.3 – 2.6), представленные в виде поверхностей отклика.

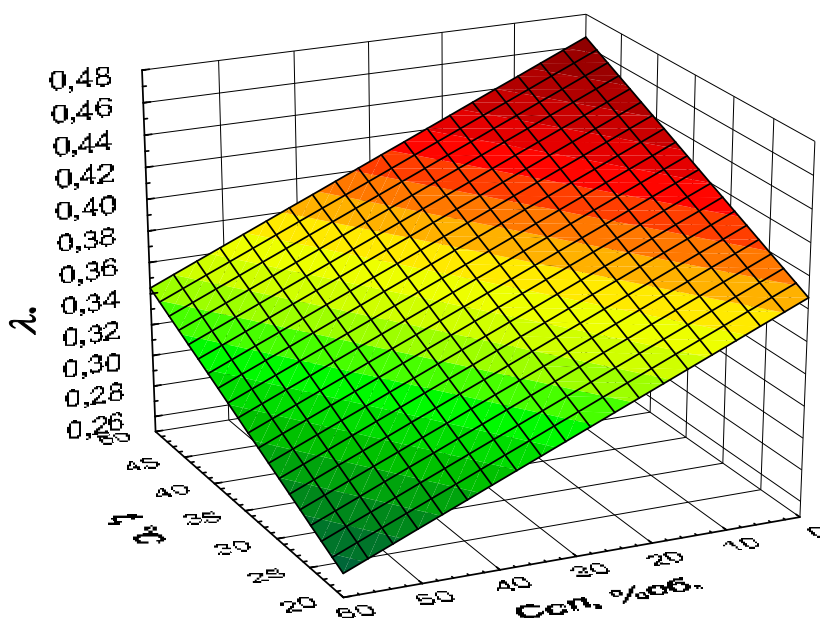


Рисунок 2.3 – Зависимость коэффициента теплопроводности экстрактов боярышника кроваво-красного от температуры и содержания спирта

Как видно из данных поверхностей отклика, с увеличением температуры экстрактов их теплопроводность возрастает. Это можно объяснить ослаблением межмолекулярных связей в экстрактах с ростом температуры, что способствует повышению скорости передачи энергии от более нагретых частиц экстрактов к менее нагретым [34].

При увеличении концентрации сухих веществ и спирта теплопроводность экстрактов уменьшается. Вероятно, это связано с тем, что коэффициенты

теплопроводности спирта и сухих растворенных веществ имеют более низкие показатели по отношению к коэффициенту теплопроводности воды при одной и той же температуре. Соответственно, при увеличении содержания спирта и сухих веществ в экстрактах общая теплопроводность этих трехкомпонентных смесей будет снижаться.

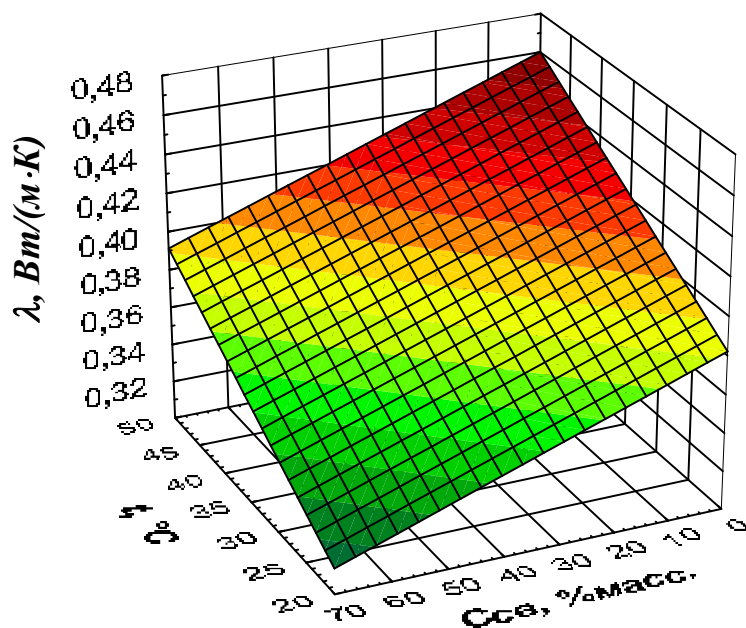


Рисунок 2.4 – Зависимость коэффициента теплопроводности экстрактов боярышника кроваво-красного от температуры и содержания сухих веществ

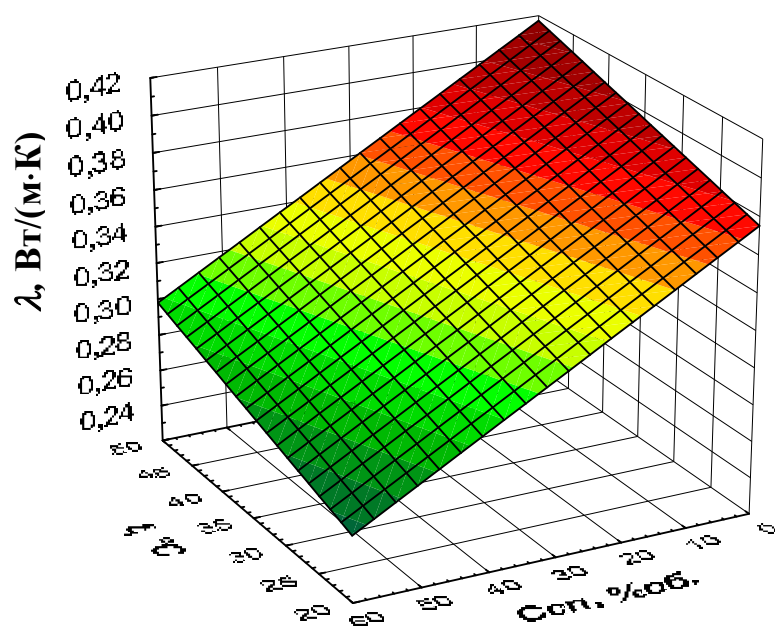


Рисунок 2.5 – Зависимость коэффициента теплопроводности экстрактов калины обыкновенной от температуры и содержания спирта

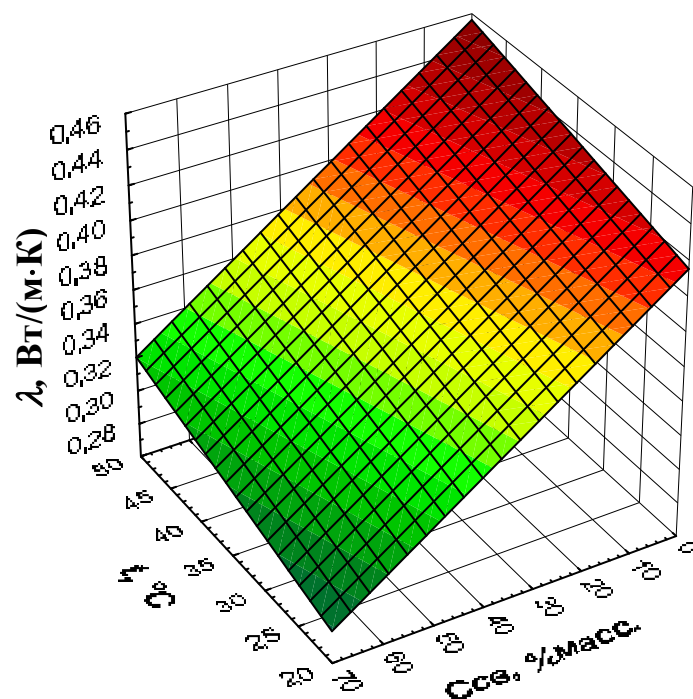


Рисунок 2.6 – Зависимость коэффициента теплопроводности экстрактов калины обыкновенной от температуры и содержания сухих веществ

Результаты исследования удельной теплоёмкости экстрактов представлены в виде графиков на рисунках 2.7 – 2.10.

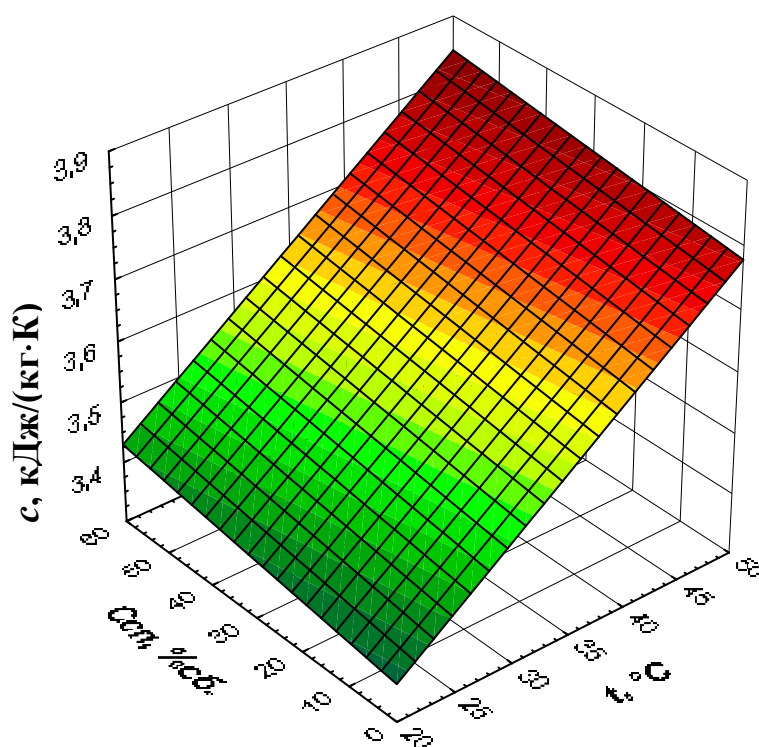


Рисунок 2.7 – Зависимость коэффициента теплоемкости экстрактов боярышника кроваво-красного от температуры и содержания спирта

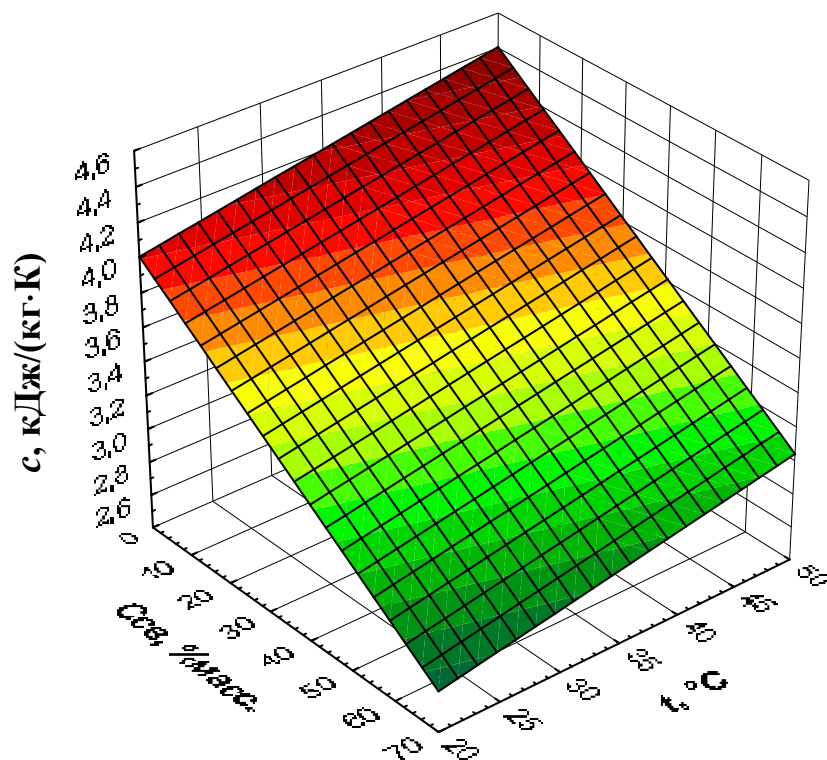


Рисунок 2.8 – Зависимость коэффициента теплоемкости экстрактов боярышника кроваво-красного от температуры и содержания сухих веществ

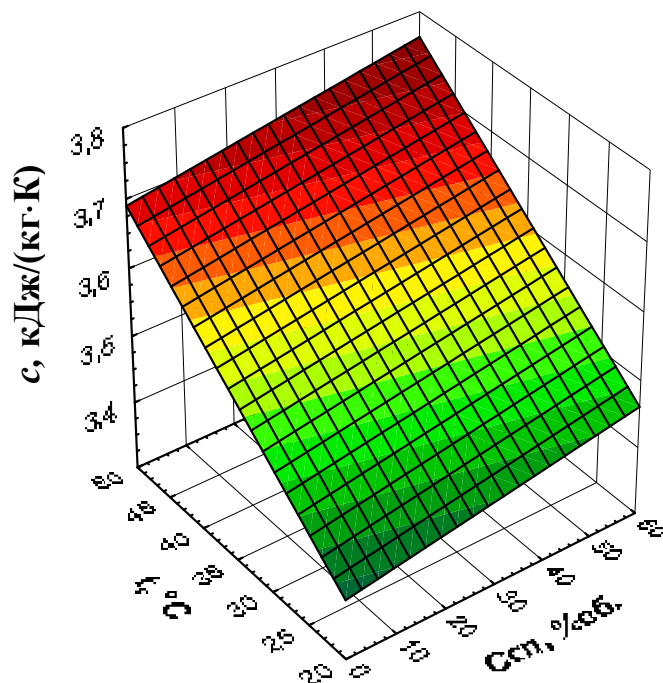


Рисунок 2.9 – Зависимость коэффициента теплоемкости экстрактов калины обыкновенной от температуры и содержания спирта



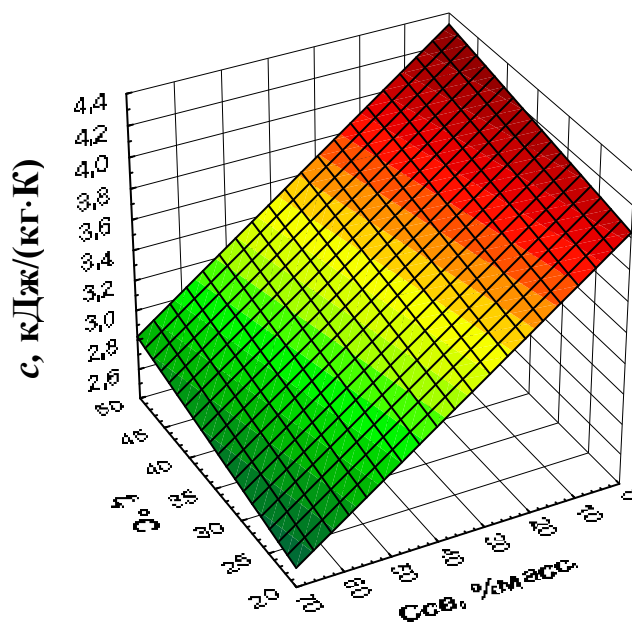


Рисунок 2.10 – Зависимость коэффициента теплоемкости экстрактов калины обыкновенной от температуры и содержания сухих веществ

Как видно из графических зависимостей, приведенных на рисунках 2.11 – 2.14, с увеличением температуры коэффициент температуропроводности экстрактов увеличивается, что объясняется возрастанием величины коэффициента теплопроводности и уменьшением плотности.

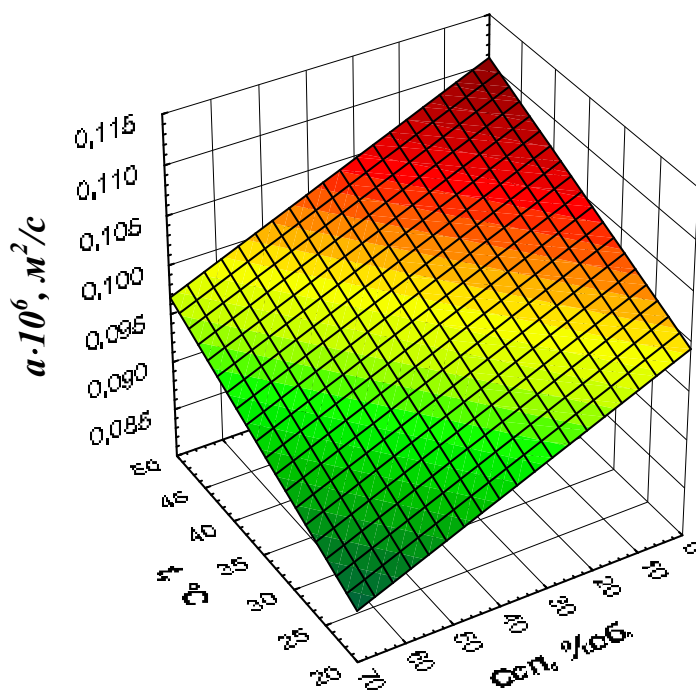


Рисунок 2.11 – Зависимость коэффициента температуропроводности экстрактов боярышника кроваво-красного от температуры и содержания спирта

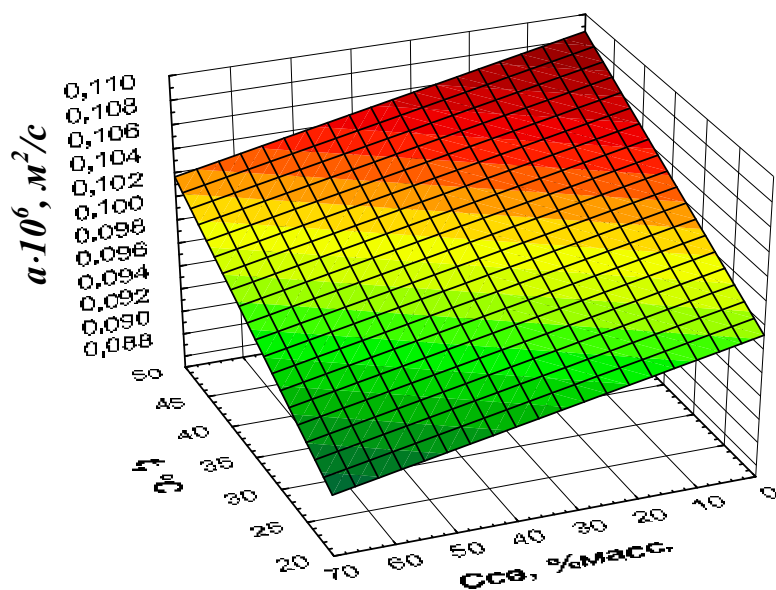


Рисунок 2.12 – Зависимость коэффициента температуропроводности экстрактов боярышника кроваво-красного от температуры и содержания сухих веществ

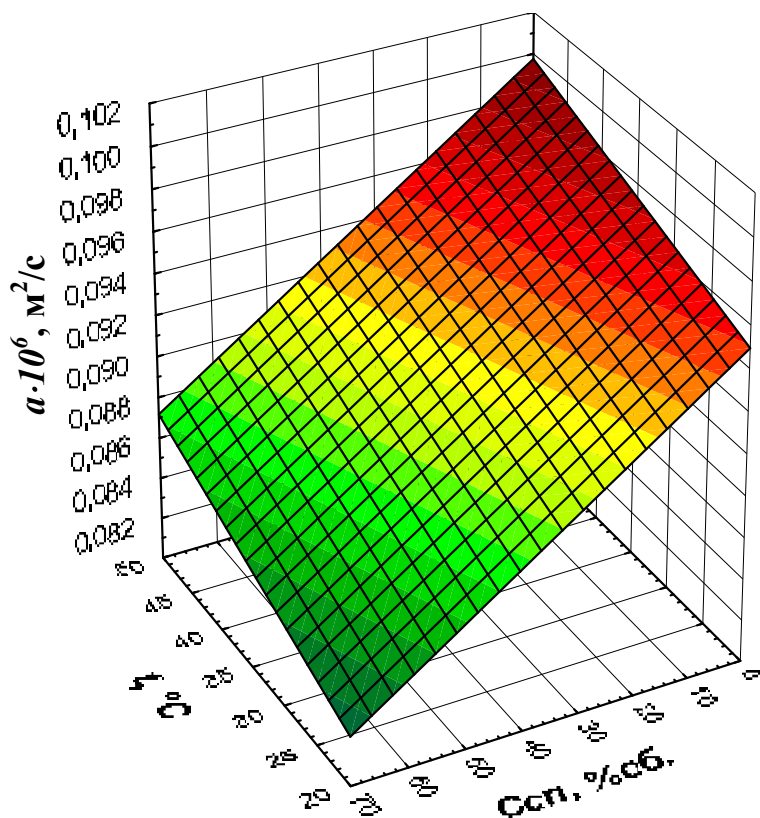


Рисунок 2.13 – Зависимость коэффициента температуропроводности экстрактов калины обыкновенной от температуры и содержания спирта

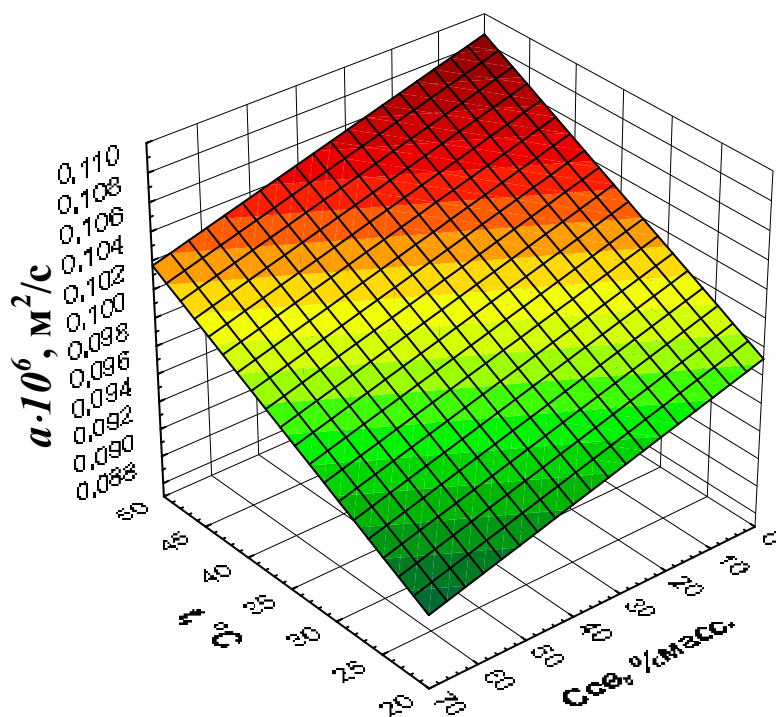


Рисунок 2.14 – Зависимость коэффициента температуропроводности экстрактов калины обыкновенной от температуры и содержания сухих веществ

С увеличением содержания сухих веществ и спирта коэффициент температуропроводности уменьшается, что также можно объяснить изменением теплопроводности, теплоемкости и плотности экстрактов при изменении в них концентраций сухих веществ и спирта.

#### 2.4 Оценка погрешности измерений теплофизических свойств

Возможные ошибки измерений по характеру происхождения можно разделить на случайные и систематические [3, 29].

Случайной называется погрешность, обусловленная действием ряда причин, меняющихся случайным образом от эксперимента к эксперименту, и имеет место, когда при последовательных измерениях постоянной величины получаются различные числовые значения.

Систематической называется погрешность, которая при повторных экспериментах остается постоянной или изменяется закономерным образом. В зависимости от возникновения, систематическую погрешность подразделяют на ме-

тодическую и инструментальную [3, 29]. Источником методической погрешности является неточность реализации требований теории метода. Инструментальная погрешность определяется точностью используемых средств измерения.

Теплофизические свойства экстрактов в данной работе определяются косвенным путем, при котором, в отличие от прямого, исследуемая величина не может быть получена непосредственно, а вычисляется как функция по результатам измерений других величин. Погрешность определяемой величины зависит от погрешностей непосредственных измерений исходных величин [29].

Погрешность результатов измерений теплофизических свойств экстрактов была оценена по систематической погрешности, определяемой при условиях, когда погрешность используемых в работе приборов и методов измерения имеет максимально возможное значение.

Максимальная относительная ошибка измерения может быть найдена, если известны максимальные относительные ошибки аргументов и вид функциональной зависимости. Оценка точности косвенных измерений состоит в определении погрешности величин-функций по известным значениям погрешностей и аргументов. В этом случае искомая величина находится из соотношения:

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n), \quad (2.15)$$

где  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$  – аргументы, независимые друг от друга.

Относительная погрешность функций может быть найдена с помощью выражения [29]:

$$\delta_Y = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial \ln f}{\partial X_i} \Delta X_i \right)^2}. \quad (2.16)$$

После логарифмирования и дифференцирования расчетных соотношений по определению коэффициентов теплопроводности (2.4) и теплоемкости (2.7) получаем выражения относительных инструментальных ошибок:

$$\delta_{\lambda_{ин}} = \pm \sqrt{\left( \frac{\Delta T_2 \cdot (T_1 - T_3)}{(T_2 - T_3) \cdot (T_1 - T_2)} \right)^2 + \frac{\Delta T_1^2}{(T_1 - T_2)^2} + \frac{\Delta T_3^2}{(T_2 - T_3)^2} + \left( \frac{\Delta \lambda_N}{\lambda_N} \right)^2 + \left( \frac{\Delta h_X}{h_X} \right)^2 + \left( \frac{\Delta h_N}{h_N} \right)^2 + \left( \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} \right)^2}, \quad (2.17)$$

$$\delta_{с.ин} = \pm \sqrt{\left(\frac{\Delta N}{N}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \tau}{\tau}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 + \frac{(\Delta T)^2}{(T_2 - T_1)^2} + \left(\frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon}\right)^2}. \quad (2.18)$$

Рассмотрим отдельные составляющие выражений (2.17) и (2.18).

Погрешности измерения температур  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  обусловлены максимально допустимой погрешностью термоЭДС, измеряемой при помощи цифрового микровольтметра Щ68003, и относительной погрешностью градуировки трех хромель-копелевых термопар (ТХК).

Допустимая погрешность измерительного прибора определяется по формуле [96]:

$$\frac{\Delta E}{E} = \pm \left[ 0,1 + 0,05 \cdot \left( \frac{E_k}{E_x} - 1 \right) \right], \quad (2.19)$$

где  $E_k$  – конечное значение диапазона измерения, равное 10 мВ;  $E_x$  – текущее значение измеряемой величины, принимаем при температуре 20 °С.  $E_x = 1,403$  мВ, в соответствии с техническими параметрами цифрового вольтметра:

$$\delta_E = \frac{\Delta E}{E} = \pm \left[ 0,1 + 0,05 \cdot \left( \frac{10}{1,403} - 1 \right) \right] = \pm 0,41\%. \quad (2.20)$$

Относительная погрешность градуировки ТХК состоит из погрешности измерения температуры теплоносителя в термостате при помощи эталонного ртутного термометра TGL 11998 с ценой деления 0,1 °С, а также из погрешности измерения термоЭДС цифровым вольтметром Щ68003 и может быть рассчитана по формуле [96]:

$$\frac{\Delta K_T}{K_T} = \pm \left( \frac{0,1}{T} \cdot 100 + \left[ 0,1 + 0,05 \cdot \left( \frac{10}{E_T} - 1 \right) \right] \right), \quad (2.21)$$

где  $T$  – температура в °С;  $E_T$  – термоЭДС в мВ, соответствующая  $T$ .

Как видно из выражения (2.21), относительная погрешность градуировки термопары  $\Delta K_i/K_i$  зависит от температуры и будет максимальной при минимальной температуре. Подставив в данное выражение значения  $T = 20$  °С и  $E_T = 1,403$  мВ, получим:

$$\delta_{K_T} = \frac{\Delta K_T}{K_T} = \pm \left( \frac{0,1}{20} \cdot 100 + \left[ 0,1 + 0,05 \cdot \left( \frac{10}{1,403} - 1 \right) \right] \right) = \pm 0,91\% . \quad (2.22)$$

Относительная погрешность измерения температуры одной (*i*-й) термопарой составляет  $\delta_{T_i} = \pm(\delta_E + \delta_{K_i}) = \pm 1,32\%$ .

Абсолютную погрешность измерения температуры *i*-й термопарой можно определить из формулы [29]:

$$\delta_{T_i} = \pm \frac{\Delta T_i}{T_i} \cdot 100\% , \quad (2.23)$$

откуда 
$$\Delta T_i = \pm \frac{\delta_{T_i} \cdot T_i}{100\%} . \quad (2.24)$$

Из выражения (2.24) видно, что  $\Delta T_i$  будет максимальной при максимальном значении  $T_i$ . Поэтому для определения абсолютной погрешности были приняты верхние границы измеряемых температур  $T_1=47,996$  °С,  $T_2=35,74304$  °С,  $T_3=9,998$  °С. При данных температурах абсолютные погрешности измерения для термопар, рассчитанные по формуле (2.24), составят:  $\Delta T_1=\pm 0,634$  °С,  $\Delta T_2=\pm 0,472$  °С,  $\Delta T_3=\pm 0,132$  °С.

Относительная погрешность определения теплопроводности глицерина составляет  $\Delta \lambda_N / \lambda_N = \pm 2\%$  [9].

Относительная погрешность измерения толщины исследуемого образца и толщины эталона при помощи штангенциркуля с ценой деления 0,02 мм соответственно составят:

$$\frac{\Delta h_X}{h_X} = \frac{0,02}{10} \cdot 100\% = 0,2\% , \quad (2.25)$$

$$\frac{\Delta h_N}{h_N} = \frac{0,02}{10} \cdot 100\% = 0,2\% . \quad (2.26)$$

Предельное отклонение (абсолютная максимальная погрешность) постоянной прибора  $\Delta \varepsilon_{\max}$  определяется по формуле [29]:

$$\Delta \varepsilon_{\max} = t_q \cdot s , \quad (2.27)$$

где  $t_q$  – квантиль распределения Стьюдента, выбираемый в зависимости от

числа повторений опыта  $n$  и доверительной вероятности появления отклонения, превышающего  $\Delta\varepsilon_{max} - q$ . Приняты  $q = 0,05$  и  $n = 5$  (число степеней свободы  $n-1 = 4$ ), откуда  $t_q = 2,78$  [29].

Значение среднеквадратичного отклонения  $s$  для  $n$  результатов находится по формуле [29]:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\varepsilon_i - \bar{\varepsilon})^2}{n-1}}, \quad (2.28)$$

где  $\bar{\varepsilon} = \frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i}{n}$  – среднее значение постоянной прибора для пяти повторений опыта. Как говорилось ранее в разделе 2.1, для определения поправочного коэффициента (постоянной прибора) была проведена серия опытов на эталонной жидкости (дистиллированная вода). По результатам проведенных исследований для вычисления среднеквадратичного отклонения был принят случай наибольшего расхождения результатов эксперимента с табличными значениями (при средней температуре эталонной жидкости  $T = 24,71$  °C).

Подставив данные из таблицы 2.1 в выражение (2.28), получим  $s = 0,00261$  и  $\Delta\varepsilon_{max} = 0,0072558$ .

Относительная погрешность постоянной прибора будет максимальной при минимальном значении  $\varepsilon$ . Принято  $\varepsilon = 1,015$ , при котором относительная погрешность постоянной прибора равна:

$$\delta_\varepsilon = \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} \cdot 100\% = \frac{0,0072558}{1,015} \cdot 100\% = 0,714\%. \quad (2.29)$$

После определения всех составляющих уравнения (2.17) рассчитывается общая инструментальная погрешность измерения коэффициента теплопроводности:

$$\delta_{\lambda_{ин}} = \pm \left[ \left\{ \frac{47,996 - 9,998}{(35,74304 - 9,998) \cdot (47,996 - 35,74304)} \right\}^2 \cdot 0,472^2 + \frac{0,634^2}{(47,996 - 35,74304)^2} + \frac{0,132^2}{(35,74304 - 9,998)^2} + 2^2 + 0,2^2 + 0,2^2 + 0,714^2 \right]^{1/2} = \pm 2,14\%. \quad (2.30)$$

Методическая погрешность определения коэффициента теплопроводности сведена к минимуму путем введения в выражение (2.4) поправочного коэффициента  $\varepsilon$ .

Для определения максимально возможной погрешности измерения удельной теплоемкости экстрактов рассмотрим отдельные составляющие выражения (2.18). Предельная относительная погрешность измерения электрической мощности  $\Delta N/N$  при помощи ваттметра Д5016 класса точности 0,2 ГОСТ 8476-78 вычисляется по формуле:

$$\delta_N = \pm K \frac{X_n}{X}, \quad (2.31)$$

где  $X_n$  – нормирующее значение, равное конечному значению шкалы – 150 Вт;  $X$  – измеряемая величина в делениях шкалы, равная 12,5 Вт;  $K$  – класс точности прибора – 0,2.

Относительная погрешность измерения электрической мощности составляет  $\pm 2,4$  %.

При измерении времени электронным секундомером с разрешением  $\pm 0,01$  с имеет место погрешность, обусловленная реакцией наблюдателя (погрешность пуска и остановки секундомера) и погрешность хода секундомера. Относительная погрешность измерения времени, которая будет максимальной при минимальном времени нагревания, равном 120 с, составляет:

$$\frac{\Delta \tau}{\tau} = \pm \frac{0,01}{120} \cdot 100\% = \pm 0,008\% . \quad (2.32)$$

Погрешность пуска и остановки секундомера не превышает половины разрешающей способности:

$$\frac{\Delta \tau}{\tau} = \pm \frac{0,01}{120} \cdot 100\% = \pm 0,008\% . \quad (2.33)$$

Таким образом, максимальная суммарная относительная ошибка измерения времени равна 0,016 %.

Относительная погрешность измерения массы  $\Delta m/m$  при помощи лабораторных электронных весов модели MW-150 с точностью измерения  $\pm 0,005$  г равна:



$$\delta_m = \pm \frac{\Delta m}{m} \cdot 100\% = \pm \frac{0,005}{90} \cdot 100\% = \pm 0,006\%, \quad (2.34)$$

где  $m$  – минимальная измеренная масса.

Погрешность измерения разности температур оценивается по формуле

$$\delta_T = \pm \frac{\Delta T}{T} \cdot 100\% = \pm \frac{0,1}{20} \cdot 100\% = \pm 0,5\%. \quad (2.35)$$

Предельное отклонение (абсолютная максимальная погрешность) постоянной прибора  $\Delta \varepsilon_{max} = \Delta \varepsilon / \varepsilon$  (погрешность вследствие неучета потерь теплоты) определяется по формулам (2.27), (2.28), [29] и равняется  $\pm 0,751\%$ .

Определив все составляющие уравнения (2.18), рассчитываем инструментальную ошибку измерения удельной теплоемкости:

$$\delta_{с.ин} = \pm \sqrt{2,4^2 + 0,016^2 + 0,006^2 + 0,5^2 + 0,751^2} = \pm 2,56\%. \quad (2.36)$$

Методическая погрешность определения коэффициента теплоемкости сведена к минимуму путем введения в выражение (2.7) поправочного коэффициента  $\varepsilon$ .

Оценку случайной погрешности  $\delta_{сл. \tau}$  измерения времени нагрева образца от температуры  $T_1$  до температуры  $T_2$ , обусловленную уровнем внимательности наблюдателя, его положением (углом наблюдения за шкалой термометра), температурой воздуха в помещении, провели по результатам испытаний прибора на эталонной жидкости (дистиллированной воде). Данные, полученные в результате проведения экспериментов, представлены в таблице 2.3.

Среднеквадратическое отклонение по результатам экспериментов:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\tau_i - \bar{\tau})^2}{n-1}} = 0,694. \quad (2.37)$$

Исходя из степени свободы  $n - 1 = 4$  и принятой вероятности появления отклонения, превышающего  $\Delta \tau_{max} - q = 0,05$ , определяется квантиль распределения Стьюдента  $t_q = 2,78$  [29].

Абсолютная случайная погрешность измерения времени нагрева образца от температуры  $T_1$  до температуры  $T_2$  определяется по формуле [29]

$$\Delta\tau_{max} = t_q \cdot s = 2,78 \cdot 0,694 = 1,929 \text{ с.} \quad (2.38)$$

Таблица 2.3

**Результаты эксперимента и данные для расчета случайной погрешности измерения времени нагревания образца**

№ опыта	$\tau_i, \text{с}$	$\bar{\tau}, \text{с}$	$\tau_i - \bar{\tau}, \text{с}$	$(\tau_i - \bar{\tau})^2, \text{с}^2$
1	220	220,134	-0,134	0,017956
2	219,1		-1,034	1,069158
3	221		0,866	0,749956
4	220,01		-0,124	0,015378
5	219,86		-0,274	0,075076

Относительная случайная погрешность измерения времени равна:

$$\delta_{сл.\tau} = \pm \frac{\Delta\tau_{max}}{\tau} \cdot 100\% = \pm \frac{1,929}{219,1} = \pm 1,88\% \quad (2.39)$$

Результирующая (суммарная) погрешность измерения теплоемкости определяется как  $\delta_C = \pm (\delta_{C.ин} + \delta_{сл.\tau}) = \pm (2,56 + 1,88) = \pm 4,44\%$ .

## 2.5 Выводы по главе

1 Экспериментально исследованы теплофизические свойства (ТФС) экстрактов боярышника кроваво-красного и калины обыкновенной (теплопроводность, теплоемкость и температуропроводность) в зависимости от температуры, концентрации сухих веществ и спирта в диапазонах, удовлетворяющих практическим требованиям.

2 В результате математической обработки опытных данных на ЭВМ в среде статистического пакета "STATISTICA-6,0" получены зависимости, описывающие распределение значений теплопроводности, теплоемкости и температуропроводности экстрактов боярышника кроваво-красного и калины обыкновенной от температуры и содержания в них сухих веществ и спирта, пригодные для инженерных расчетов, с отклонением, не превышающим 9 %.

### ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ДЕАЛКОГОЛИЗАЦИИ И КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ ЖИДКИХ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ В РОТОРНОМ РАСПЫЛИТЕЛЬНОМ ИСПАРИТЕЛЕ

В третьей главе проведено исследование теплообмена в РРИ при деалкоголизации и концентрировании жидких пищевых продуктов, определены рациональные режимы переработки плодово-ягодных экстрактов боярышника кроваво-красного и калины обыкновенной.

Одним из важных показателей, характеризующих процесс теплопередачи, является термическое сопротивление теплообменного аппарата, возникающее при передаче тепла от теплоносителя (горячая вода) к раствору (экстракту) через тонкую стенку (корпус РРИ).

Из уравнения теплопередачи [33] следует, что при заданных размерах стенки и температурах теплоносителей величиной, определяющей теплопередачу, является коэффициент теплопередачи –  $K$ . Но поскольку теплопередача явление сложное, то правильное решение можно найти только на основе анализа частных составляющих, характеризующих процесс теплообмена. При передаче теплоты через цилиндрическую стенку коэффициент теплопередачи можно записать [33]

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{СТ}} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_2}}. \quad (3.1)$$

Полное термическое сопротивление теплопередаче в аппарате складывается из термического сопротивления теплоотдачи от поверхности стенки к кипящему раствору –  $(1/(\alpha_1 \cdot d_1))$ , термического сопротивления теплопроводности стенки –  $((1/(2 \cdot \lambda_{СТ})) \cdot \ln(d_2/d_1))$  и термического сопротивления теплоотдачи от греющего агента, движущегося в кольцевом канале, к поверхности стенки –  $(1/(\alpha_2 \cdot d_2))$ , здесь  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – коэффициенты теплоотдачи соответственно от поверхности стенки к раствору и от теплоносителя к стенке;  $d_1$  и  $d_2$  – соответственно внутренний и наружный диаметр цилиндрической стенки.

В задачу исследования теплообмена в РРИ входит изучение теплоотдачи при dealкоголизации и концентрировании жидких пищевых продуктов к поверхности теплообмена РРИ от горячего теплоносителя в условиях турбулизации последнего воздухом с целью определения рациональных режимов dealкоголизации и концентрирования плодово-ягодных экстрактов боярышника кроваво-красного и калины обыкновенной.

### **3.1 Теплообмен на контактном элементе роторного распылительного испарителя**

Как уже отмечалось, теплоотдача на КЭ РРА носит сложный характер и зависит от большого числа параметров. Из анализа опубликованных данных, представленного в главе 1, следует, что и массообмен и теплообмен на КЭ РРА осуществляется в несколько стадий, причем для каждой стадии влияние одних и тех же параметров на коэффициент массо- и теплопередачи неодинаково.

Перенос тепла от греющей стенки к упариваемому раствору на КЭ происходит в сложной гидродинамической обстановке, обусловленной различными скоростями и условиями движения, изменением физико-химических свойств (плотность, вязкость, поверхностное натяжение) и теплофизических характеристик (теплоемкость, теплопроводность, температуропроводность) раствора. Как уже отмечалось ранее, основными стадиями переноса массы и тепла на КЭ РРИ являются: полет капель распыленной жидкости в свободном объеме КЭ, удар этих капель о поверхность пластинок пристенного каплеотбойника, движение жидкости по обогреваемой поверхности корпуса, где в образующейся турбулизованной пленке происходит кипение раствора и испарение растворителя.

Проведенные ранее исследования [106, 112] показали высокую эффективность применения РРИ при производстве концентрированных жидких пищевых продуктов. Как уже говорилось в главе 1, результатом этих исследований является критериальное уравнение (1.5), характеризующее связь между интенсивностью теплоотдачи на КЭ и температурным полем в пограничном слое потока [106].

Уравнение (1.5) имеет следующие безразмерные комплексы:

- пленочный критерий Рейнольдса –  $Re_{nl} = \frac{G_p}{\pi \cdot \rho \cdot d_k \cdot D} \cdot \frac{d_k}{\nu} = \frac{U_{nl} \cdot d_k}{\nu}$ ;
- критерий Пекле –  $Pe_u = Re_u \cdot Pr = (U_K \cdot d_K) / a$ ;
- критерий Фруда –  $Fr = U_K^2 / (g \cdot d_K)$ ;
- критерий Кутателадзе –  $K = r / (\mathcal{G} \cdot c_p)$ ;
- критерий Вебера –  $We = (p \cdot U_K \cdot d_K) / \sigma$ ;
- симплекс геометрического подобия –  $d_K / D$ ;
- кратность циркуляции –  $Z = G_p / G_n$ ,

где  $d_K$  – диаметр капель в факеле распыла, м;  $p$  – давление в аппарате, кПа;  $U_K$  – скорость полета капель, м/с;  $\sigma$  – поверхностное натяжение, н/м;  $r$  – удельная теплота парообразования, Дж/кг;  $\mathcal{G}$  – разность между температурой поверхности нагрева и температурой кипения раствора, К;  $c_p$  – удельная теплоемкость продукта, кДж/(кг·К);  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $D$  – диаметр контактного элемента, м;  $a$  – коэффициент температуропроводности продукта, м<sup>2</sup>/с;  $G_p$  – производительность диспергирующего устройства распылителя, кг/с;  $G_n$  – питание КЭ по упариваемому раствору, кг/с;  $\rho$  – плотность продукта, кг/м<sup>3</sup>;  $\nu$  – кинематическая вязкость продукта, м<sup>2</sup>/с;  $U_{nl}$  – скорость пленки, м/с.

Данное уравнение в явном виде получено в результате обработки экспериментальных данных исследования процесса концентрирования водно-спиртовых экстрактов красной рябины и красной смородины [106].

Проверка применимости уравнения (1.5) для определения коэффициента теплоотдачи  $\alpha_l$  была произведена в работе [31] при концентрировании водных экстрактов шиповника, расхождение значений  $\alpha_l$ , полученных экспериментальным и расчетным путем, не превышало 15%.

Оценивая возможность применения уравнения (1.5) для расчета коэффициента  $\alpha_l$  в условиях турбулизации горячего теплоносителя воздухом, можно сказать, что данное уравнение было получено в работе [106] при изменении входящих в него параметров в следующих пределах:

$$Nu=3...16; Re_{nl}=1600...8000; Pe_u=47000...55000; (Re_u=1700...12000; Pr=4...30);$$

$$We=180...360; Fr=70...280; K=12...20; Z=10...80; \left(\frac{H}{D}\right)=1. \quad (3.2)$$

Согласно первой теореме теории подобия [34], процессы считаются подобными, если все соответствующие критерии подобия, входящие в критериальное уравнение, описывающее данные процессы, будут равны.

Следовательно, формулу (1.5) можно принять в качестве расчетной для определения коэффициента теплоотдачи  $\alpha_l$  при условии нахождения входных параметров процесса теплообмена на КЭ РРИ в соответствующих диапазонах (3.2). Поэтому, исходя из подобия тепловой и гидродинамической обстановки на КЭ РРИ, при проведении экспериментов в настоящей работе, тепловой и гидродинамической обстановке на КЭ РРИ при проведении экспериментов, описанных в работе [106], формулу (1.5) можно использовать для расчета коэффициента теплоотдачи  $\alpha_l$  с обязательной проверкой критериев подобия на соответствие условиям (3.2).

### 3.2 Анализ условий теплоотдачи в греющей рубашке

Теплоноситель, имеющий более высокую температуру, чем нагреваемая среда, и отдающий тепло, является греющим агентом. Выбор теплоносителя зависит в первую очередь от требуемой температуры нагрева и необходимости её регулирования. Кроме того, он должен обеспечивать достаточно высокую интенсивность теплообмена при небольших массовых и объёмных его расходах, иметь малую химическую активность и невысокую стоимость [34, 106].

Всеми этими качествами обладает вода. Она является доступным, дешевым, нетоксичным и некоррозионноактивным материалом, имеющим высокую теплоемкость и обеспечивающим высокие значения коэффициента теплоотдачи.

Горячая вода обычно применяется для нагрева поверхности теплопередачи до температур не более 100 °С. Для повышения эффективности процесса теп-

лоотдачи организуется ее принудительная циркуляция, которая осуществляется с помощью насоса.

Поэтому в качестве греющего агента в экспериментальной выпарной установке была выбрана горячая вода с температурой 84 ... 100 °С, движущаяся в рубашке испарителя, в вертикальном цилиндрическом канале, в условиях вынужденной конвекции.

Теплоотдачу между стенкой канала и жидкостью, движущейся относительно стенки, можно рассчитать в любом сечении канала, используя местный коэффициент теплоотдачи. В инженерных задачах более важно рассчитать общее количество теплоты, передаваемой на участке канала или во всём канале, используя средний коэффициент теплоотдачи, определяемый следующим образом [33]:

$$\bar{\alpha} = q / \Delta \bar{T}, \quad (3.3)$$

где  $\Delta \bar{T}$  – среднелогарифмический температурный напор:

$$\Delta \bar{T} = \frac{(T_{ж}' - T_c) - (T_{ж}'' - T_c)}{\ln \left[ \frac{(T_c - T_{ж}')}{(T_c - T_{ж}'')} \right]},$$

где  $T_{ж}'$ ,  $T_{ж}''$  – среднемассовая температура жидкости соответственно на входе и выходе;  $T_c$  – температура стенки канала.

РРА, работающий в качестве испарителя, является теплообменником, изготовленным из двух концентрических, круглых труб (рисунок 1.3). В кольцевом зазоре между трубами движется греющий теплоноситель. Теплота передаётся от теплоносителя к внутренней стенке, в то время как внешняя – теплоизолирована.

Коэффициент теплоотдачи в кольцевом канале зависит от различных факторов и большого числа переменных параметров, обуславливающих процесс теплоотдачи в целом. В общем случае коэффициент теплоотдачи зависит от геометрических размеров, которые определяют форму профиля скорости, от отношения диаметров  $d_2$  и  $d_1$  (рисунок 1.3), режима движения и температуры теплоносителя, физических свойств жидкости и др.

В кольцевых каналах переход от ламинарного течения к турбулентному происходит при числах Рейнольдса около 2300 [34]. При числах  $Re > 10^4$  течение является полностью турбулентным. В пределах между нижней и верхней границами чисел  $Re$  лежит зона переходного течения. Следовательно, для расчета коэффициента теплоотдачи необходимо рассчитать критерий  $Re$ .

Определяющим геометрическим размером, используемым для расчета чисел  $Nu$ ,  $Pe$  и  $Re$ , является гидравлический диаметр кольцевого канала [33, 34]:

$$d_{\text{г}} = \frac{4 \cdot F}{\Pi} = \frac{4 \left( \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} - \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \right)}{\pi \cdot d_2 + \pi \cdot d_1} = \frac{d_2^2 - d_1^2}{d_2 + d_1} = d_2 - d_1. \quad (3.4)$$

Задачи, связанные с гидродинамикой и теплообменом при ламинарном течении, явились предметом аналитических исследований большого числа ученых в течение многих лет. В источниках [33, 95, 128] собраны имеющиеся в литературе аналитические решения задач теплообмена при ламинарной вынужденной конвекции жидкости в круглых и некруглых трубах при различных граничных условиях. Исследование теплообмена и гидродинамики в кольцевых каналах в отличие от исследования в круглых трубах усложняется двумя обстоятельствами. Во-первых, кольцевые каналы в общем случае не являются геометрически подобными, и поэтому наряду с эквивалентным диаметром необходимо использовать дополнительные определяющие геометрические параметры. Для концентрических каналов таким параметром служит отношение диаметров внутренней и наружной труб  $d_1/d_2$  [33, 95]. Во – вторых, граничные условия на внутренней и наружной поверхности могут быть различными. В рубашке РРИ вода течет в кольцевом зазоре между трубами, при этом теплота передается от внутренней стенки, в то время как внешняя термоизолирована. Для концентрических кольцевых каналов в [95] получено соотношение для числа Нуссельта для полностью развитого ламинарного течения:

$$Nu = Nu_{\infty} + f \left( \frac{d_1}{d_2} \right) \cdot \frac{0,19 [Pe(d_{\text{г}} / L)]^{0,8}}{1 + 0,117 [Pe(d_{\text{г}} / L)]^{0,467}}. \quad (3.5)$$

Это соотношение применимо для ламинарного течения ( $Re < 2300$ ) при  $0,1 <$



$Pr < 10^3$ ;  $0 < (d_1/d_2) < 1$ . Значение  $Nu_\infty$  соответствует числу  $Nu$  на большом удалении от входа в канал ( $L \rightarrow \infty$ ). Приблизительное аппроксимационное выражение для  $Nu_\infty$ , для случая, когда теплота передается от внутренней стенки, в то время как внешняя теплоизолирована, имеет вид [95]:

$$Nu_\infty = 3,66 + 1,2 \cdot \left( \frac{d_1}{d_2} \right)^{-0,8}. \quad (3.6)$$

Функция  $f(d_1/d_2)$  согласно [95] имеет вид:

$$f\left(\frac{d_1}{d_2}\right) = 1 + 0,14 \cdot \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{0,5}. \quad (3.7)$$

Переход к турбулентному течению в каналах начинается при числе  $Re = 2300$ . Течение становится полностью турбулентным при  $10^4 \leq Re$  в зависимости от степени турбулентности потока на выходе и формы входного сечения.

Измерения коэффициентов теплоотдачи при граничных условиях первого ( $t_c = \text{const}$ ) и второго ( $q_c = \text{const}$ ) родов показали, что в значениях коэффициентов теплоотдачи отличие несущественно [95]. Поэтому уравнения, приведенные ниже, можно использовать независимо от тепловых граничных условий. Сравнение большого числа экспериментальных данных по теплоотдаче с известными в литературе корреляционными уравнениями, приведенное в [126], показало, что полуэмпирические уравнения, аналогичные корреляции, предложенной Прандтлем, лучше других описывают экспериментальные данные. Уравнение Прандтля для полностью развитого турбулентного течения имеет вид:

$$Nu = \frac{(f/8) \cdot Re \cdot Pr}{1 + 8,7 \cdot \sqrt{f/8} (Pr - 1)}, \quad (3.8)$$

где  $f$  - коэффициент сопротивления трения при турбулентном течении. Для гладких труб  $f$  - функция только числа Рейнольдса. Модификации уравнения (3.8), известные из литературы [95], можно привести к уравнению:

$$Nu = \frac{(f/8) \cdot Re \cdot Pr}{k_1 + k_2 \cdot \sqrt{f/8} (Pr^n - 1)}. \quad (3.9)$$

В [70, 95] предложены следующие значения:  $k_1=1$ ;  $k_2=12,7$ ;  $n=2/3$ .

Соотношение (3.9) в области полностью развитого турбулентного течения лучше других зависимостей описывает поведение экспериментальных данных по теплоотдаче [95].

Поскольку уравнение (3.9) основано на модели полностью равного турбулентного течения и не учитывает влияния входных эффектов, оно не применимо в переходном от ламинарного к турбулентному течению. Эта зависимость модифицирована заменой  $Re$  на  $(Re - 1000)$  и введением множителя для учета влияния начального участка. Полученное соотношение имеет вид:

$$Nu = \frac{f/8 \cdot (Re-1000) \cdot Pr}{1 + 12,7 \cdot \sqrt{f/8} (Pr^{2/3} - 1)} \left[ 1 + \left( \frac{d_{\text{э}}}{L} \right)^{2/3} \right]. \quad (3.10)$$

По формуле Г. Филоненко коэффициент сопротивления трения для турбулентного течения в трубе можно рассчитать, используя соотношение [33]:

$$f = (1,82 \cdot \lg Re - 1,64)^{-2}. \quad (3.11)$$

При числе  $Re < 10^4$  широко используется также формула Блазиуса [35]:

$$f = 0,316 \cdot Re^{-1/4}. \quad (3.12)$$

Уравнение (3.10) рекомендуется применять в следующем диапазоне параметров:  $0 < (d_{\text{э}}/L) < 1$ ;  $0,6 < Pr < 2000$  и  $2300 < Re < 10^6$ .

При расчете чисел Нуссельта в переходной области лучше использовать соотношение, дающее более высокие значения  $Nu$  [95]:

для  $1,5 < Pr < 500$

$$Nu = 0,012 \cdot (Re^{0,87} - 280) \cdot Pr^{0,4} \cdot \left[ 1 + \left( \frac{d_{\text{э}}}{L} \right)^{2/3} \right]. \quad (3.13)$$

Теплоотдачу в турбулентном потоке газов и жидкостей в концентрических каналах можно определить, используя модифицированную форму уравнения (3.10) для турбулентного течения в трубах при граничных условиях (теплообмен на внутренней стенке, внешняя теплоизолирована) [95]:

$$Nu = Nu_{\text{ТР}} \cdot 0,86 \left( \frac{d_1}{d_2} \right)^{-0,16}. \quad (3.14)$$

Широко известна формула М.А. Михеева [38] при развитом турбулентном течении в прямых трубах и каналах  $Re > 10^4$ :

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr_{жс}^{0,43} \cdot (Pr_{жс} / Pr_c)^{0,25} \cdot \varepsilon. \quad (3.15)$$

Коэффициент  $\varepsilon$  в формуле (3.15) учитывает влияние входного участка. Значение этого коэффициента зависит от отношения  $L/d$ :

$$\text{При } L/d < 15 \quad \varepsilon = 1,38 \cdot (L/d)^{-0,12}, \text{ при } L/d > 15 \quad \varepsilon = 1.$$

По данным [33, 35], средние коэффициенты теплоотдачи на внутренней стенке при турбулентном течении капельных жидкостей в каналах кольцевого поперечного сечения можно рассчитать по уравнению:

$$Nu = 0,017 \cdot Re_{жс}^{0,8} \cdot Pr_{жс}^{0,4} \cdot (Pr_{жс} / Pr_c)^{0,25} \cdot (d_2/d_1)^{0,18}. \quad (3.16)$$

В работе [106], исходя из условия обеспечения турбулентного режима течения теплоносителя в греющей рубашке, определен рекомендуемый расход воды на обогрев РРИ, составляющий  $V_B = (3,5 \dots 4) \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Однако, несмотря на все достоинства воды, используемой в качестве греющего агента циркулирующего в греющей рубашке выпарного аппарата, несколько ограничена возможность создания высокой разницы температур – движущей силы процесса упаривания. Следовательно, становится актуальной задача интенсификации теплообмена между греющим агентом и стенкой – корпусом РРИ. Решение этой задачи позволит значительно повысить эффективность данного выпарного аппарата.

Вопросы интенсификации теплообмена рассматриваются как при модернизации действующих установок с целью повышения их производительности, так и при проектировании новых. Интенсификация теплообмена является эффективным путем решения проблемы уменьшения массы и габаритных размеров теплообменных аппаратов и устройств [35].

Интенсифицировать теплообмен в РРИ можно не только за счет организации оптимальных гидродинамических режимов протекания теплообменных процессов внутри самого аппарата, но и за счет интенсификации отдачи тепла от теплоносителя к поверхностям нагрева [121, 122]. Достигнуть этого можно путем повышения скорости потока теплоносителя, турбулизацией потока раз-

личными завихряющими устройствами и другими способами [100, 103, 117].

В тех случаях, когда в потоке возникает турбулентное течение, микроскопические элементы жидкости внутри него начинают совершать различные, внешне беспорядочные движения [33, 127, 130]. В этом случае происходит передача количества движения от одного элемента жидкости к другому, и возникает добавочное касательное напряжение в дополнение к касательному напряжению за счет молекулярных взаимодействий [123, 124]. При наличии теплообмена между стенкой и жидкостью возникает градиент температуры (или энтальпии) поперек потока, и отдельные элементы жидкости при своем движении попадают в области, где их средняя температура изменяется. Такое движение порождает добавочную теплопередачу в дополнение к теплопередаче за счет молекулярной теплопроводности [5, 61, 97, 108].

При выборе способа турбулизации потока с целью интенсификации процесса теплообмена необходимо стремиться к минимизации энергетических затрат на прокачивание теплоносителя через греющие элементы теплообменного аппарата. С этой точки зрения наиболее подходящим представляется способ турбулизации потока жидкости струей инертного газа (воздуха), вдуваемой в него. Данный способ не требует каких-либо серьезных изменений в конструкции теплообменного аппарата при его модернизации; отпадает необходимость в установке каких-либо турбулизирующих элементов, которые резко повышают гидравлическое сопротивление в каналах теплоносителя; потребление энергии на инжектирование струи воздуха в поток жидкости незначительно [97].

Большой эффект увеличения теплоотдачи за счет наполнения потока теплоносителя пузырьками газа обусловлен еще и тем, что в различных местах непосредственно у поверхности теплообмена, на которой задерживаются газовые пузырьки, происходит разрушение пограничного слоя [33]. Поэтому вязкий заторможенный слой жидкости сохраняется лишь на участках поверхности, не занятых газовыми пузырьками.

Однако тот же источник отмечает, что, хотя при вынужденной конвекции двухфазного газожидкостного потока и имеет место турбулизация погранично-

го слоя жидкости, возрастающая за счет турбулентных пульсаций, которые увеличиваются с повышением скорости движения потока, она никогда не приводит к полному разрушению пограничного слоя, а лишь уменьшает его эффективную толщину. Это связано с тем, что турбулентные возмущения идут в направлении из объема потока к стенке и полностью на всю толщину пограничного слоя не распространяются [33]. Таким образом, при любой скорости движения на поверхности теплообмена сохраняется тонкий ламинарный (вязкий) подслой, с большим тепловым сопротивлением.

Несмотря на явную перспективность вышеуказанного метода интенсификации теплообмена, каких-либо данных по исследованию влияния степени турбулизации потока теплоносителя в греющей рубашке выпарного аппарата инжектированным в него воздухом на величину теплоотдачи не найдено. Поэтому одной из задач настоящего исследования является оценка влияния режимов инъекции струи газа в поток горячего теплоносителя на степень интенсивности теплообмена в РРИ при переработке жидких смесей.

### **3.3 Схема экспериментальной установки и методика проведения эксперимента**

Целью данных экспериментальных исследований являлось изучение эффективности деалкоголизации и концентрирования жидких продуктов при выпаривании в РРИ. Исследования проводились на модернизированной экспериментальной выпарной установке. В ее основу была принята схема, представленная в работе [106].

При концентрировании продуктов в РРИ соблюдались требования, выполнение которых обеспечивает поддержание устойчивого режима процессов деалкоголизации и концентрирования продуктов, исключает снижение качества получаемого готового продукта и создает условия эффективного проведения процесса.

1 Вакуумная система обеспечивает создание в исследуемом объеме разряжения с остаточным давлением порядка  $4,5 \cdot 10^3 \dots 6 \cdot 10^3$  Па.

2 Использование в качестве греющего теплоносителя горячей воды с температурой 84 ... 100 °С, обеспечивающей интенсивную теплоотдачу со стороны теплоносителя.

3 Подача исходного продукта осуществляется за счет вакуума в установке.

4 Установка позволяет осуществлять непрерывный отвод готового продукта при непрерывной работе, оснащена надежной системой конденсации вторичных паров.

5 Рабочая поверхность корпуса РРИ и основных элементов установки, соприкасающихся с обрабатываемым продуктом, изготовлена из нержавеющей стали и других материалов, разрешенных для использования в пищевом машиностроении.

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 3.1. Основным элементом является вертикальный роторный распылительный испаритель – 1, снабженный рубашкой для обогрева, выполненной из стали.

Внутренний диаметр аппарата –  $D = 0,15$  м, площадь поверхности корпуса, обогреваемая рубашками, составляет  $F = 0,256$  м<sup>2</sup>. Аппарат содержит шесть КЭ, конструкция которых описана в разделе 1.1.

Распылитель имеет следующие характеристики: диаметр диспергирующего устройства –  $D_p = 0,075$  м, его высота –  $H_p = 0,042$  м, диаметр отверстий –  $d_o = 2 \cdot 10^{-3}$  м, количество рядов отверстий – 7, количество отверстий в одном ряду – 32, отверстия расположены в шахматном порядке.

Обогрев установки осуществляется следующим образом. Основной компонент греющего газожидкостного теплоносителя (вода) подается в рубашку обогрева корпуса РРИ из деаэрационной колонны – 36 через вентиль – 43 и вентиль регулирования подачи – 41 (при закрытом вентиле 44). Далее вода подогревается в подогревателе – 4 со ступенчатой регулировкой мощности электрообогрева, снабженном четырьмя трубчатыми электронагревателями мощностью по 4 кВт.

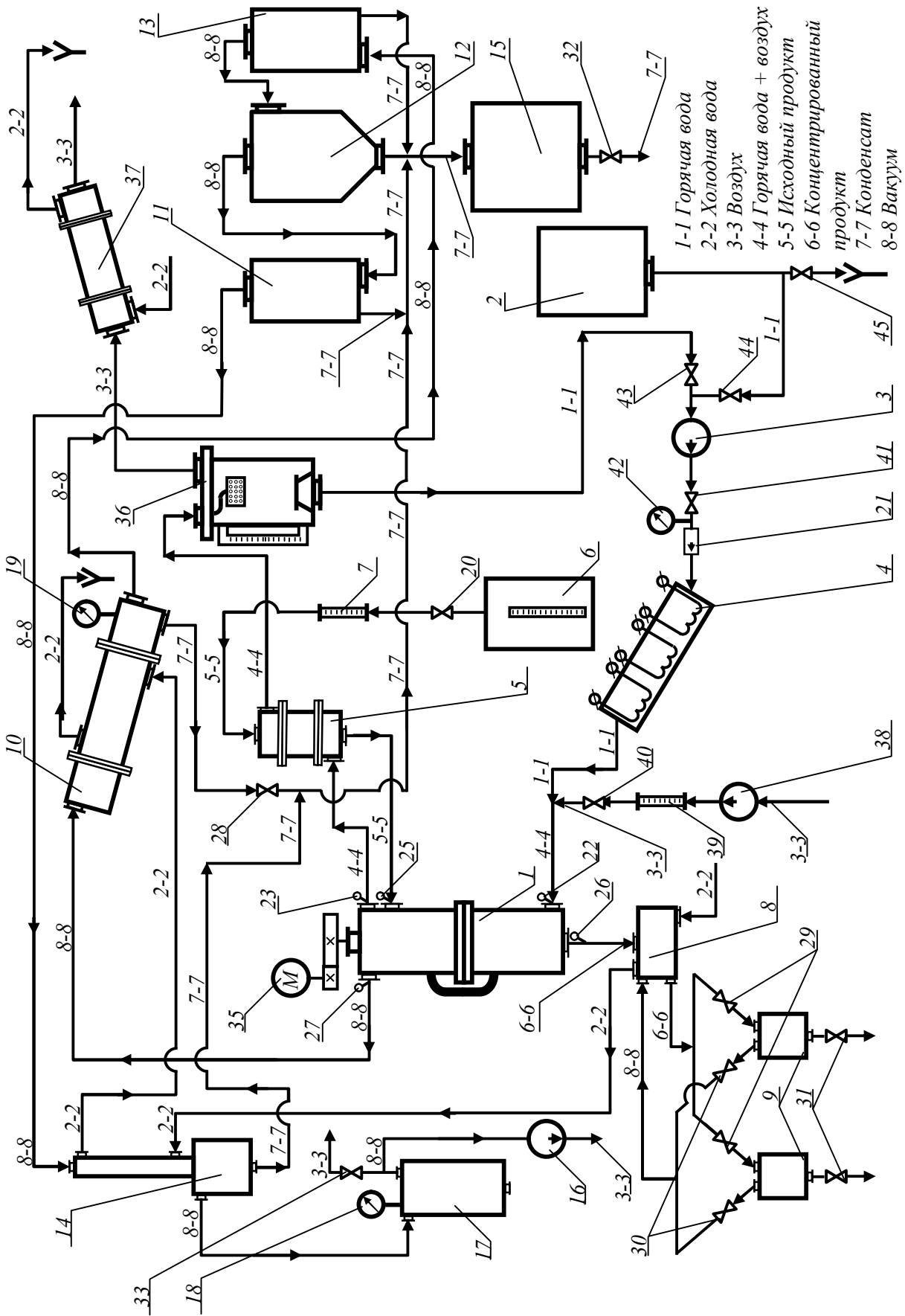


Рисунок 3.1 – Схема экспериментальной выпарной установки

Циркуляция горячего теплоносителя в установке осуществляется с помощью центробежного насоса – 3 марки ВК – 5/46. Расход воды измеряется счетчиком горячей воды – 21 модели ВСГ – 25, класса В-Н. Давление воды на выходе из регулировочного вентиля 41 измеряется манометром – 42 марки МТП-100 с пределами измерения  $0 \dots 10 \text{ кг/см}^2$ , класса точности 2,5.

Перед входом теплоносителя в греющую рубашку РРИ в систему подачи вмонтирована трубка из нержавеющей стали с наружным диаметром 9 мм и проходным отверстием диаметром 6 мм. Через данную трубку осуществляется ввод второго компонента теплоносителя (сжатого воздуха) в поток воды.

Направление ввода воздуха совпадает с направлением потока воды. Подача сжатого воздуха осуществляется при помощи компрессора – 38 модели CR-2.0/24.

Регулирование подачи воздуха в систему осуществляется игольчатым вентилем – 40. Измерение подачи воздуха производится при помощи ротаметра – 39 типа РС-5, тарированного при помощи термоанемометра марки ТКА-ПКМ/60 с пределами измерения скорости воздуха  $v = 0,1 \dots 20 \text{ м/с}$  и погрешностью измерения  $\delta = (\pm 0,045 + 0,05v)$  при  $v = 0,1 \dots 1,0 \text{ м/с}$  и  $\delta = (\pm 0,1 + 0,05v)$  при  $v > 1,0 \dots 20 \text{ м/с}$ . Регистрация давления, создаваемого компрессором в системе подачи воздуха, производится с помощью штатного манометра компрессора.

Пройдя через греющую рубашку РРИ, двухфазный горячий теплоноситель подается на обогрев тонкопленочного подогревателя – 5, затем направляется в деаэрационную колонну – 36, где происходит разделение газожидкостной смеси. Из деаэрационной колонны вода, через вентиль – 43, поступает в насос – 3 и вновь направляется на обогрев установки.

Воздух из деаэрационной колонны, вместе с неизбежно попадающими в него паром и мелкими каплями воды, поступает в теплообменник – 37, где пар конденсируется и под действием силы тяжести конденсат стекает обратно в деаэрационную колонну.

При работе РРИ исходный продукт подается из мерной емкости – 6 объемом 20 л, через регулировочный игольчатый вентиль – 20 в тонкопленочный



подогреватель – 5. Измерение расхода исходного продукта производится с помощью ротаметра – 7 модели РМ-0.1Ж УЗ, тарированного объемным методом. Далее подогретый исходный продукт поступает на верхний контактный элемент РРИ – 1 и, последовательно проходя все шесть КЭ, стекает в нижнюю часть выпарного аппарата. При этом происходит концентрирование продукта.

К нижней части корпуса испарителя прикреплен приемник готового продукта – 8, оборудованный рубашкой охлаждения. Проходя через него, готовый продукт охлаждается и перетекает в две сборные емкости – 9 объемом по 50 л каждая, с вентилями – 29 для регулировки подачи готового продукта. Из емкостей – 9 концентрированный продукт отводится через вентили – 31.

Образующиеся в процессе выпаривания вторичные пары направляются из РРИ в конденсатор – 10. Для повышения эффективности улавливания водно-спиртовых паров и капель жидкости в установке используются насадочные каплеуловители – 11, 13; циклонная ловушка капель – 12; ловушка – холодильник – 14. Конденсат через вентиль – 28, для регулировки подачи конденсата, стекает в емкость – 15 и отводится через вентиль – 32.

Разрежение в установке создается механическим форвакуумным насосом – 16 типа ВН, с вакуумным ресивером – 17. Измерение давления в установке осуществляется вакуумметрами типа ВПЗ-У – 18, 19. Управление давлением в емкостях 9 производится вентилями – 30. Регулирование глубины вакуума в установке производится вентилем – 33.

Ротор аппарата приводится во вращение от электропривода – 35 с помощью сменных зубчатых колес.

Измерение температур продукта и теплоносителя осуществлялось термометрами – 22 ... 27 типа ТЛ с ценой деления 0,1°C.

Выполнение экспериментов проводилось в следующем порядке. Установка герметизировалась. Необходимая глубина вакуума создавалась вакуум-насосом 16 и регулировалась вентилем 33. Из емкости 2, при закрытых ventилях 43 и 45 и открытых ventилях 41 и 44, производилось заполнение системы обогрева установки с помощью насоса 3. Количество воды в системе контролировалось

при помощи мерной трубки, встроенной в деаэрационную колонну. При достижении уровня воды в колонне отметки, соответствующей 20 л, вентиль 44 закрывался и одновременно открывался вентиль 43.

Затем холодная вода из водопроводной сети через рубашку приемника готового продукта 8, ловушку – холодильник 14 подавалась в конденсатор 10. Далее включались электрические нагреватели, расположенные в подогревателе теплоносителя 4. Мощность, подаваемая на обогрев, регулировалась количеством включенных трубчатых электронагревателей. Расход горячей воды регулировался вентилем 43 и контролировался по показаниям счетчика – 21.

По достижении заданной глубины вакуума и температуры теплоносителя включался электропривод ротора 35.

Для подачи исходного продукта в РРИ открывался вентиль 20. Подогрев продукта осуществлялся в подогревателе 5 до заданной температуры, которая зависела от глубины вакуума, затем продукт поступал в роторный испаритель 1.

Сконцентрированный продукт собирался в охлаждаемый приемник 8 и отводился в емкости 9. Регулировка скорости отвода готового продукта осуществлялась вентилями – 29, 31. Пары водно-спиртового конденсата конденсировались в конденсаторе 10, циклонной ловушке капель 12, ловушке – холодильнике 14 и отводились в емкость 15. Слив конденсата из емкости 15 осуществлялся через вентиль 32.

По завершении эксперимента отключали электрообогрев, центробежный насос, электропривод ротора. Закрывали вентиль 34, отключали привод вакуум-насоса и открывали вентиль 33. После того, как давление в установке сравнивалось с атмосферным, прекращали подачу охлаждающей воды. Из приемников 9 сливался готовый продукт, а из емкости 15 конденсат.

В ходе эксперимента измеряли и контролировали:

- глубину вакуума  $p$  в конденсаторе 10 измеряли вакуумметром ВПЗ-У (19), в ресивере 17 контролировали вакуумметром ВПЗ-У (18);

- объем исходного продукта  $W_H$  определяли объемным способом;
- расход исходного раствора  $V_H$ , подаваемого в РРИ, контролировали с помощью ротаметра 7, при этом расход менялся в пределах  $V_H=(0,83\dots 1,94)\cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup>/с. Время подачи продукта из мерного сосуда 6 измеряли секундомером;
- расход воды, подаваемой в рубашки РРИ, составлял  $V_B=8,33\cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/с и контролировался счетчиком горячей воды 21;
- расход воздуха –  $V_{ВОЗД}$ , вводимого в теплоноситель, регулировали игольчатым вентилем 40 и контролировали с помощью ротаметра 39, при этом расход менялся в пределах  $V_{ВОЗД}=(0\dots 6,17)\cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup>/с.
- частота вращения ротора составляла  $n=540$  об/мин;
- температуру теплоносителя на входе  $t_{B,H}$  и выходе  $t_{B,K}$  измеряли термометрами 22 и 23 ( $t_{B,H}=84 \dots 100$  °С);
- температуру исходного продукта, подогретого в тонкопленочном подогревателе 5 и подаваемого в РРИ  $t_H$ , измеряли термометром 25;
- температура сконцентрированного продукта на выходе из аппарата  $t_K$  измерялась термометром 26;
- температура паров, подаваемых в конденсатор 10  $t_{ПАР}$ , зависела от глубины вакуума в установке и измерялась термометром 27.

По окончании эксперимента определяли:

- объем сконцентрированного продукта ( $W_K$ ), концентрацию спирта ( $C_{СП.К}$ ) и сухих растворимых веществ ( $C_{СВ.К}$ ) в нем;
- объем водного или водно-спиртового конденсата ( $W_{КОНД}$ ) и концентрацию спирта в нем ( $C_{СП.КОНД}$ ).

Содержание спирта и сухих веществ определяли по стандартным методикам [11, 53]. В качестве модельных растворов использовались: водный раствор NaCl ( $C_{СВ}=8$  %масс.), водный раствор этанола ( $C_{СП}=5$  %об.), водно – спиртовые экстракты боярышника кроваво-красного с концентрациями:

$$C_{CB} = 16,6 \text{ \%масс.}, C_{СП} = 43 \text{ \%об.};$$

$$C_{CB} = 9,6 \text{ \%масс.}, C_{СП} = 8,69 \text{ \%об.}$$

и водно – спиртовые экстракты калины обыкновенной с концентрациями:

$$C_{CB} = 16,2 \text{ \%масс.}, C_{СП} = 34,21 \text{ \%об.};$$

$$C_{CB} = 9,7 \text{ \%масс.}, C_{СП} = 14,14 \text{ \%об.}$$

Эффективность концентрирования растворов при упаривании может быть охарактеризована коэффициентом концентрирования, который представляет собой отношение [31, 87, 106, 112]

$$\varepsilon = W_K / W_H, \quad (3.17)$$

где  $W_K$ ,  $W_H$  – конечный и начальный объем упариваемого продукта. С уменьшением коэффициента концентрирования эффективность концентрирования растворов увеличивается.

Величина коэффициента  $\varepsilon$  зависит от многих параметров [106] (подачи исходного продукта, температуры греющего теплоносителя, давления в аппарате и т.д.). Кроме того, в течение некоторого времени с момента подачи в аппарат исходного продукта происходит установление процессов тепло-массообмена в аппарате, характеризующееся ростом коэффициента концентрирования. За этот промежуток времени затрачивается определенный начальный объем исходного продукта.

С целью определения необходимого для обеспечения стабильного режима работы РРИ начального объема исходного продукта  $W_H$ , была проведена серия экспериментов, результаты которых представлены на рисунках 3.2 и 3.3.

Как видно из рисунка 3.2, установление стабильного режима работы РРИ, характеризующегося неизменным по времени значением коэффициента  $\varepsilon$ , происходит при  $W_H \geq 0,03 \text{ м}^3$  (30 л).

Установившийся режим работы РРИ характеризуется также неизменным во времени средним значением коэффициента теплопередачи  $\bar{K}$ .

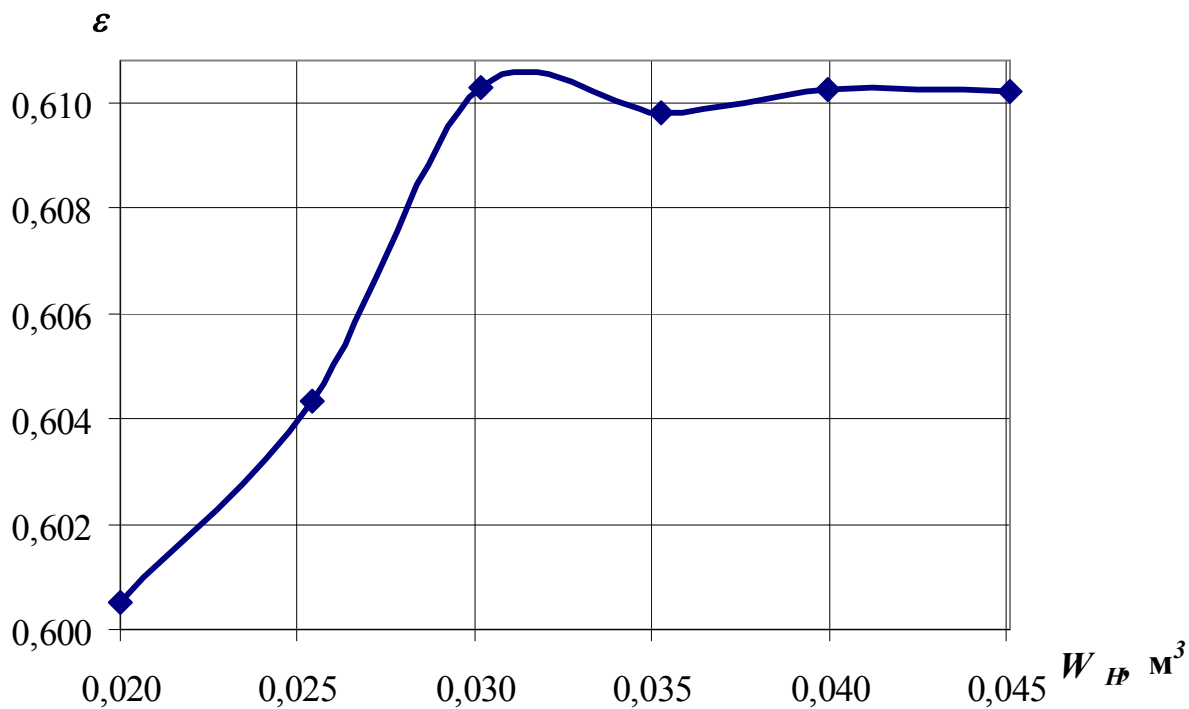


Рисунок 3.2 – Зависимость коэффициента концентрирования  $\varepsilon$  от начального объема  $W_H$  раствора NaCl

( $C_{CB} = 8\%$  масс.,  $p = 96$  кПа,  $V_{ВОЗД} = 0$  м³/с,  $V_H = 8,33 \cdot 10^{-6}$  м³/с,  $t_{B,H} = 96$  °С)

Установившийся режим работы РРИ характеризуется также неизменным во времени средним значением коэффициента теплопередачи  $\overline{K}$ .

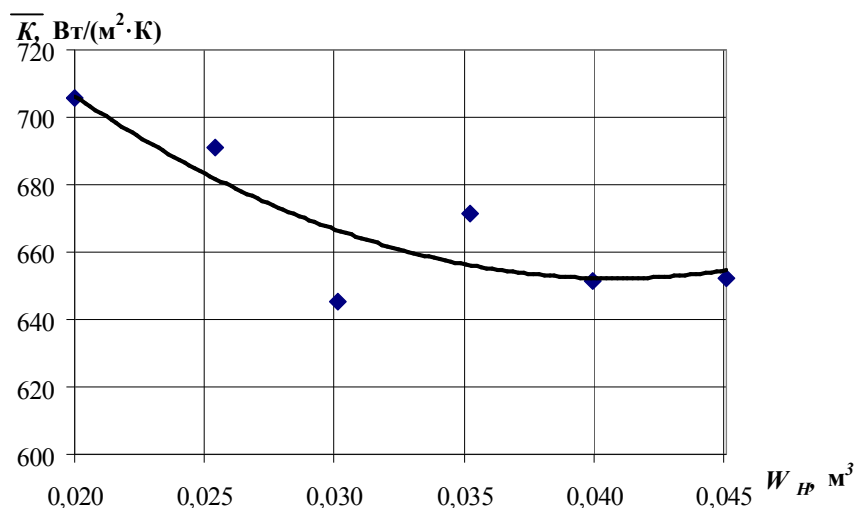


Рисунок 3.3 – Зависимость усредненного коэффициента теплопередачи  $\overline{K}$  от начального объема  $W_H$  раствора NaCl

( $C_{CB} = 8\%$  масс.,  $p = 96$  кПа,  $V_{ВОЗД} = 0$  м³/с,  $V_H = 8,33 \cdot 10^{-6}$  м³/с,  $t_{B,H} = 96$  °С)

При обработке результатов проведенных экспериментов величина коэффициента теплопередачи  $\bar{K}$  (в Вт/[м·К]) рассчитывалась по известной формуле [33, 34, 64]

$$\bar{K} = \frac{Q}{F \cdot \Delta t_{CP}}, \quad (3.18)$$

где  $Q$  – количество энергии, переданной через поверхность теплообмена, Вт;  
 $F$  – площадь поверхности теплообмена ( $F=0,256 \text{ м}^2$ );  $\Delta t_{CP}$  – средняя разность температур греющего агента и обрабатываемого продукта, К.

Количество энергии  $Q$  определялось из уравнения теплового баланса

$$Q = G_K \cdot c_K \cdot t_K + G_{\text{конд}} \cdot r_{\text{конд}}, \quad (3.19)$$

где  $G_K$ ,  $c_K$  и  $t_K$  – соответственно массовая производительность (кг/с), теплоемкость (Дж/(кг·К)) и температура концентрата (°С);  $G_{\text{конд}}$  и  $r_{\text{конд}}$  – соответственно массовая производительность (кг/с) и удельная теплота парообразования конденсата (Дж/кг).

Удельная теплота парообразования водно-спиртового конденсата определялась по уравнению [40]

$$r_{\text{конд}} = b \cdot r_{\text{СП}} + (1-b) \cdot r_B, \quad (3.20)$$

где  $b$  – относительное содержание спирта в конденсате (в массовых долях);  $r_{\text{СП}}$  и  $r_B$  – удельные теплоты парообразования спирта и воды соответственно, Дж/кг.

### **3.4 Результаты экспериментальных исследований процесса теплообмена при dealкоголизации и концентрировании жидких пищевых смесей**

В ходе экспериментальных исследований изучалось влияние величин подачи воздуха в греющий теплоноситель –  $V_{\text{возд}}$ , глубины вакуума в аппарате –  $p$ , температуры греющего агента –  $t_{B.H}$  и подачи исходного продукта –  $V_H$  на эффективность теплообмена в РРИ, с целью определения рациональных режимов процесса dealкоголизации и концентрирования жидких пищевых продуктов.

В процессе проведения экспериментов показания измерительных приборов фиксировались каждые 10 минут, результаты измерений усреднялись, количество измерений определялось продолжительностью эксперимента. Полученные экспериментальные данные приведены в приложении П 8 и представлены на рисунках 3.4 – 3.19.

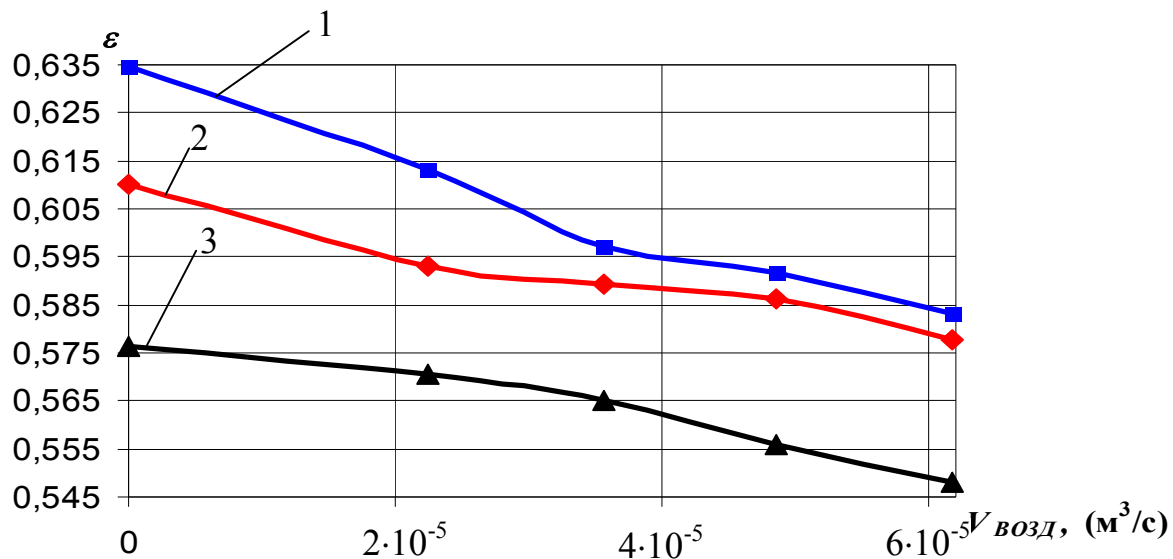


Рисунок 3.4 – Зависимость коэффициента  $\varepsilon$  от подачи воздуха  $V_{\text{ВОЗД}}$  при концентрировании раствора NaCl (8 % масс.),  $p = 88$  кПа,  $V_H = 8,33 \cdot 10^{-6}$  м³/с:  
 1 –  $t_{B,H} = 92^\circ\text{C}$ ; 2 –  $t_{B,H} = 96^\circ\text{C}$ ; 3 –  $t_{B,H} = 100^\circ\text{C}$

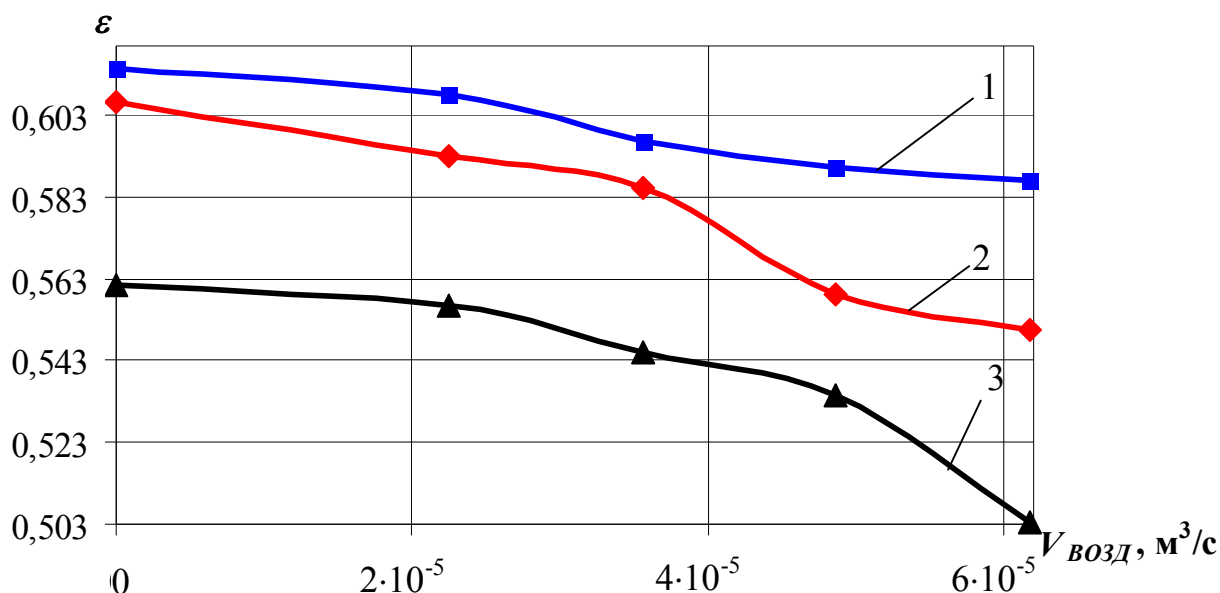


Рисунок 3.5 – Зависимость коэффициента  $\varepsilon$  от подачи воздуха  $V_{\text{ВОЗД}}$  при концентрировании раствора NaCl (8 % масс.),  $p = 92$  кПа,  $V_H = 8,33 \cdot 10^{-6}$  м³/с:  
 1 –  $t_{B,H} = 92^\circ\text{C}$ ; 2 –  $t_{B,H} = 96^\circ\text{C}$ ; 3 –  $t_{B,H} = 100^\circ\text{C}$

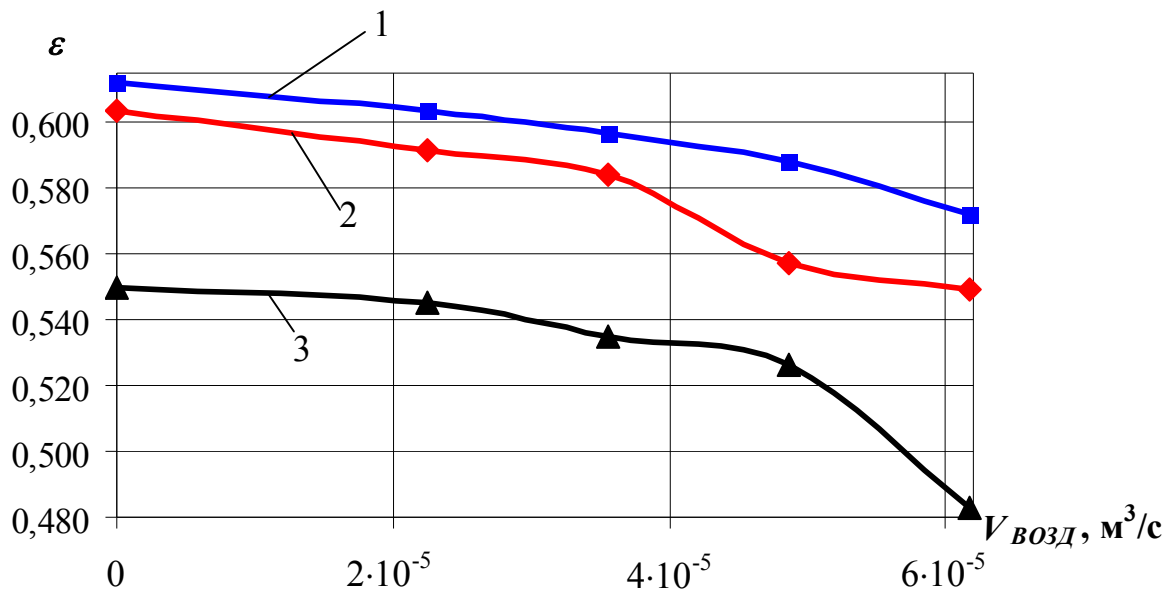


Рисунок 3.6 – Зависимость коэффициента  $\varepsilon$  от подачи воздуха  $V_{\text{ВОЗД}}$  при концентрировании раствора NaCl (8 % масс.),  $p = 96$  кПа,  $V_H = 8,33 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ :  
 1 –  $t_{B,H} = 92^\circ\text{C}$ ; 2 –  $t_{B,H} = 96^\circ\text{C}$ ; 3 –  $t_{B,H} = 100^\circ\text{C}$

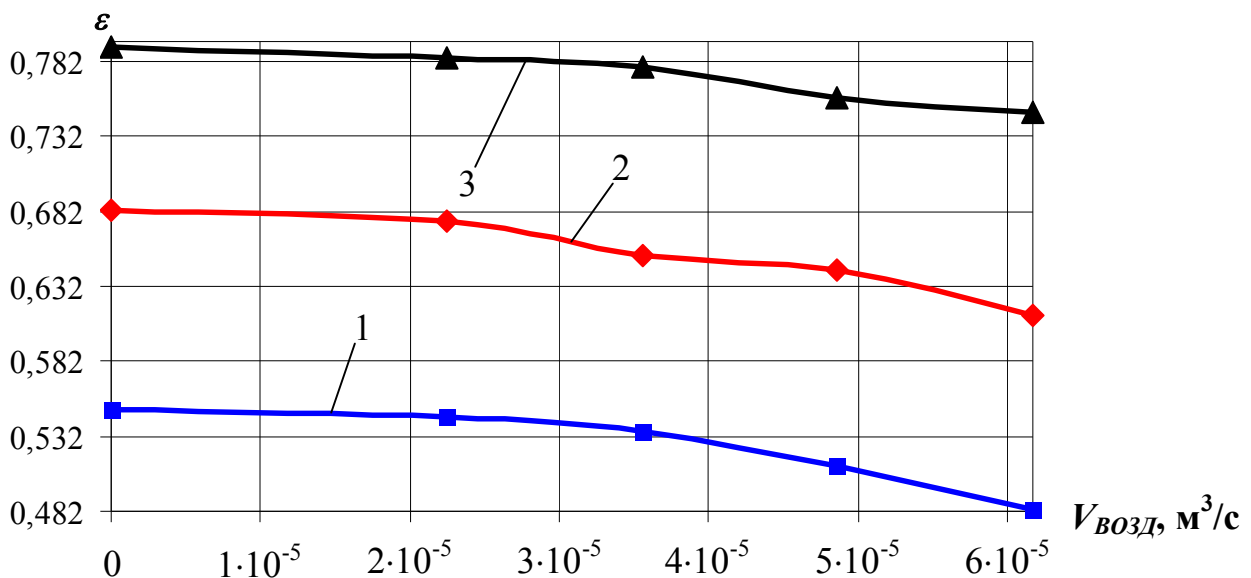


Рисунок 3.7 – Зависимость коэффициента  $\varepsilon$  от подачи воздуха  $V_{\text{ВОЗД}}$  при концентрировании раствора NaCl (8 % масс.),  $p = 96$  кПа,  $t_{B,H} = 100^\circ\text{C}$ :  
 1 –  $V_H = 8,33 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ ; 2 –  $V_H = 1,39 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$ ; 3 –  $V_H = 1,94 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$

Анализ условий теплообмена в РРИ показал, что коэффициент теплопередачи увеличивается с увеличением как температуры греющего агента и количества вводимого в него воздуха, так и глубины вакуума в аппарате. Однако, как следует из [106], эффективность процесса концентрирования в аппарате снижа-



ется с увеличением подачи исходного продукта. Поэтому исследования процесса теплообмена при концентрировании раствора хлористого натрия ( $C_{CB}=8$  %масс.) были проведены в рабочем диапазоне температур греющего агента, которые поддерживались в пределах  $t_{B.H} = 92 \dots 100$  °С с шагом в 4 °С, расходе греющей воды  $V_B = 8,33 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/с (3 м<sup>3</sup>/час) и подаче воздуха  $V_{ВОЗД} = 0 \dots 6,17 \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup>/с с шагом  $13,05 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/с. Подача исходного продукта принималась  $V_H = 0,833 \cdot 10^{-6} \dots 1,94 \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup>/с (30...70 л/ч) с шагом  $5,5 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/с (20 л/ч). Глубина вакуума в аппарате принималась равной  $p = 88 \dots 96$  кПа, с шагом в 4 кПа.

Как видно из графиков, представленных на рисунках 3.4 – 3.6, при увеличении подачи воздуха от  $V_{ВОЗД} = 0$  до  $V_{ВОЗД} = 6,17 \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup>/с коэффициент концентрирования  $\varepsilon$  уменьшается. Повышение глубины вакуума в аппарате и температуры греющего агента также ведет к снижению значения величины  $\varepsilon$ . Числовые значения результатов экспериментов приведены в приложении П 8.

Анализируя представленные графики, можно сказать, что повышение эффективности концентрирования, выраженное величиной уменьшения значения  $\varepsilon$  ( $\Delta_{\varepsilon}$ , в % от  $\varepsilon$  при  $V_{ВОЗД} = 0$  м<sup>3</sup>/с), достигает своего максимального значения при максимальной подаче воздуха  $V_{ВОЗД} = 6,17 \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup>/с.

В таблице 3.1 представлены максимальные значения  $\Delta_{\varepsilon}$ , полученные при  $V_H = 8,33 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/с,  $V_{ВОЗД} = 6,17 \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup>/с и различных температурах греющего агента.

Таблица 3.1

**Значения максимального уменьшения коэффициента концентрирования  $\varepsilon$ , по сравнению с  $\varepsilon$  при  $V_{ВОЗД} = 0$  м<sup>3</sup>/с**

$t_{B.H},$ °С	$p,$ кПа	$\varepsilon$	$\Delta_{\varepsilon},$ %
92	88	0,583	8,1
96	92	0,550	9,3
100	96	0,483	12,2

Анализ данных, приведенных в таблице, позволяет сделать вывод, что влияние подачи воздуха в горячий теплоноситель на интенсивность концентриро-

вания продукта в РРИ на нижней границе температурного диапазона теплоносителя наиболее существенно при более низких величинах глубины вакуума. С увеличением температуры глубина вакуума, обеспечивающая максимальную интенсивность концентрирования, также возрастает. По данным проведенных экспериментов, максимальное повышение интенсивности концентрирования достигается при  $V_H = 8,33 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $V_{\text{ВОЗД}} = 6,17 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $t_{B,H} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $p = 96 \text{ кПа}$ , при этом уменьшение коэффициента концентрирования  $\varepsilon$ , по сравнению с  $\varepsilon$  при  $V_{\text{ВОЗД}} = 0 \text{ м}^3/\text{с}$ , составляет  $\Delta_\varepsilon = 12,2 \%$ . Исходя из проведенного анализа, исследование влияния величины подачи исходного продукта на эффективность концентрирования было решено проводить на следующих режимах:  $V_B = 8,33 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $V_{\text{ВОЗД}} = 6,17 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $t_{B,H} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $p = 96 \text{ кПа}$ .

Подачу исходного продукта было решено принимать из диапазона  $V_H = 0,833 \cdot 10^{-6} \dots 1,94 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$ , с шагом  $5,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ .

Результаты проведенных экспериментов представлены на рисунке 3.7 и в приложении П 8.

Из представленного графика видно, что увеличение значений  $V_H$  ведет к росту коэффициента  $\varepsilon$ . Минимальное значение коэффициента концентрирования достигается при  $V_H = 8,33 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$  и равно  $\varepsilon = 0,483$ , что на  $12,2 \%$  меньше  $\varepsilon$  при  $V_{\text{ВОЗД}} = 0 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Рост значений коэффициента концентрирования при увеличении подачи исходного продукта можно объяснить тем, что в этом случае время пребывания продукта в зоне контакта с теплообменной поверхностью сокращается, кроме того, увеличивается плотность орошения КЭ, а следовательно, и толщина пленки продукта на теплообменных поверхностях КЭ, что снижает интенсивность теплообмена.

На рисунках 3.8 – 3.11 представлены зависимости усредненного коэффициента теплопередачи  $\bar{K}$  от подачи воздуха для описанных выше экспериментов. Значения  $\bar{K}$  рассчитывались по формуле (3.18).

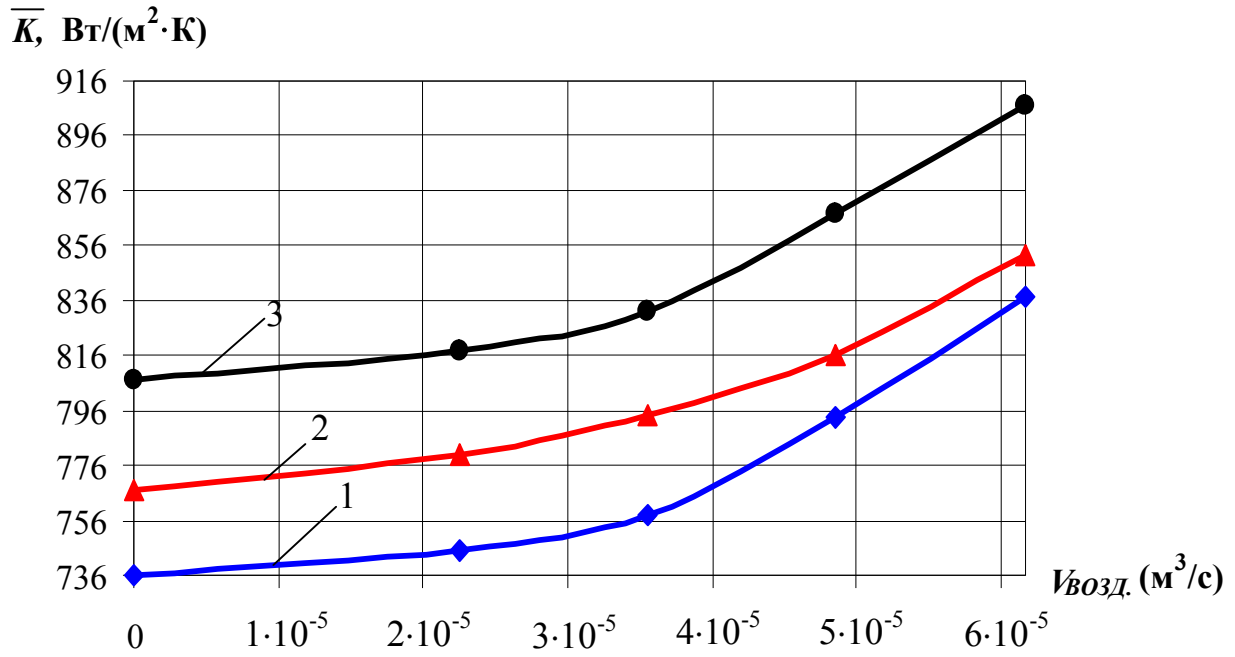


Рисунок 3.8 – Зависимость коэффициента  $\bar{K}$  от подачи воздуха  $V_{\text{ВОЗД}}$  при концентрировании раствора NaCl (8 % масс.),  $p = 88$  кПа,  $V_H = 8,33 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ : 1 –  $t_{B,H} = 92^\circ\text{C}$ ; 2 –  $t_{B,H} = 96^\circ\text{C}$ ; 3 –  $t_{B,H} = 100^\circ\text{C}$

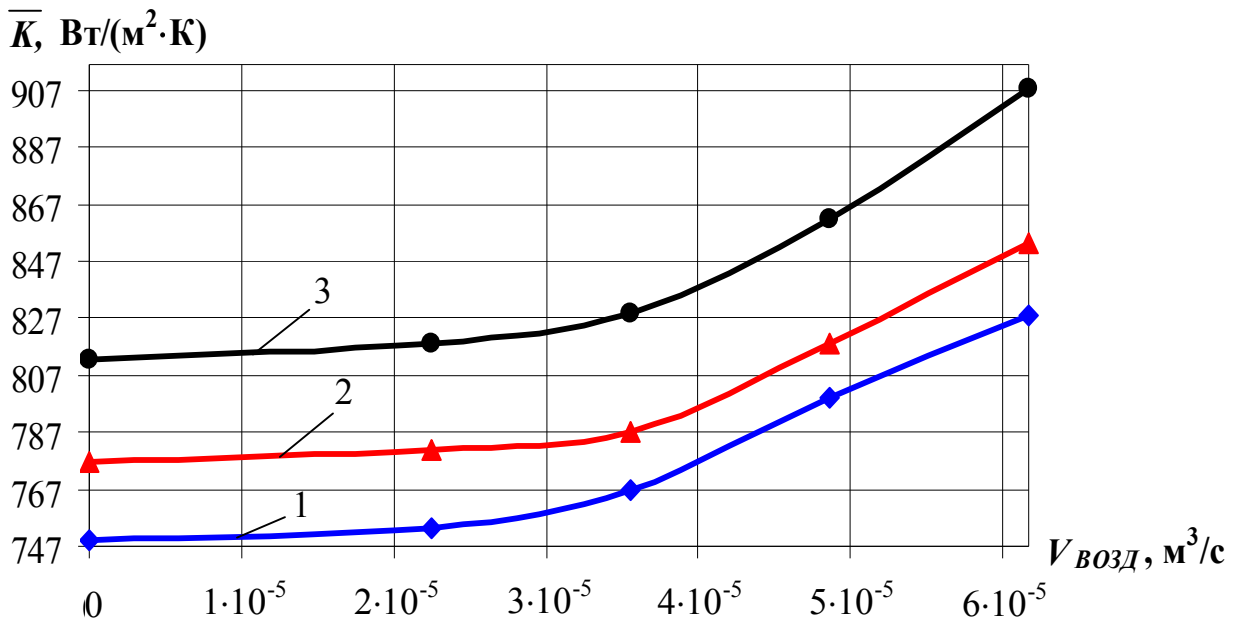


Рисунок 3.9 – Зависимость коэффициента  $\bar{K}$  от подачи воздуха  $V_{\text{ВОЗД}}$  при концентрировании раствора NaCl (8 % масс.),  $p = 92$  кПа,  $V_H = 8,33 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ : 1 –  $t_{B,H} = 92^\circ\text{C}$ ; 2 –  $t_{B,H} = 96^\circ\text{C}$ ; 3 –  $t_{B,H} = 100^\circ\text{C}$

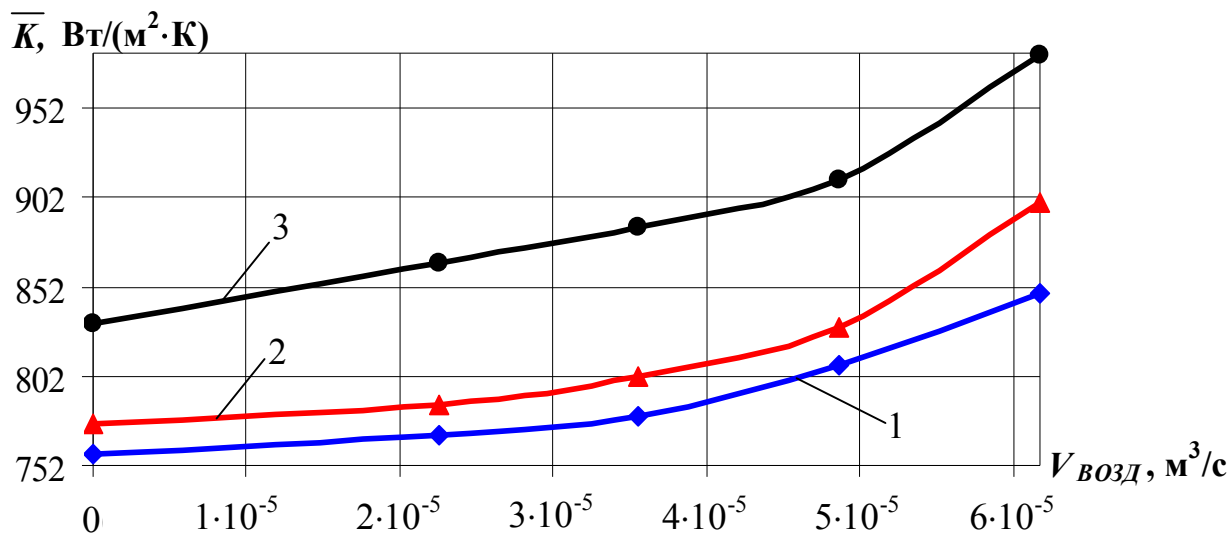


Рисунок 3.10 – Зависимость коэффициента  $\bar{K}$  от подачи воздуха  $V_{\text{ВОЗД}}$  при концентрировании раствора NaCl (8 % масс.),  $p = 96$  кПа,  $V_H = 8,33 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ :

1 –  $t_{B,H} = 92 \text{ °C}$ ; 2 –  $t_{B,H} = 96 \text{ °C}$ ; 3 –  $t_{B,H} = 100 \text{ °C}$

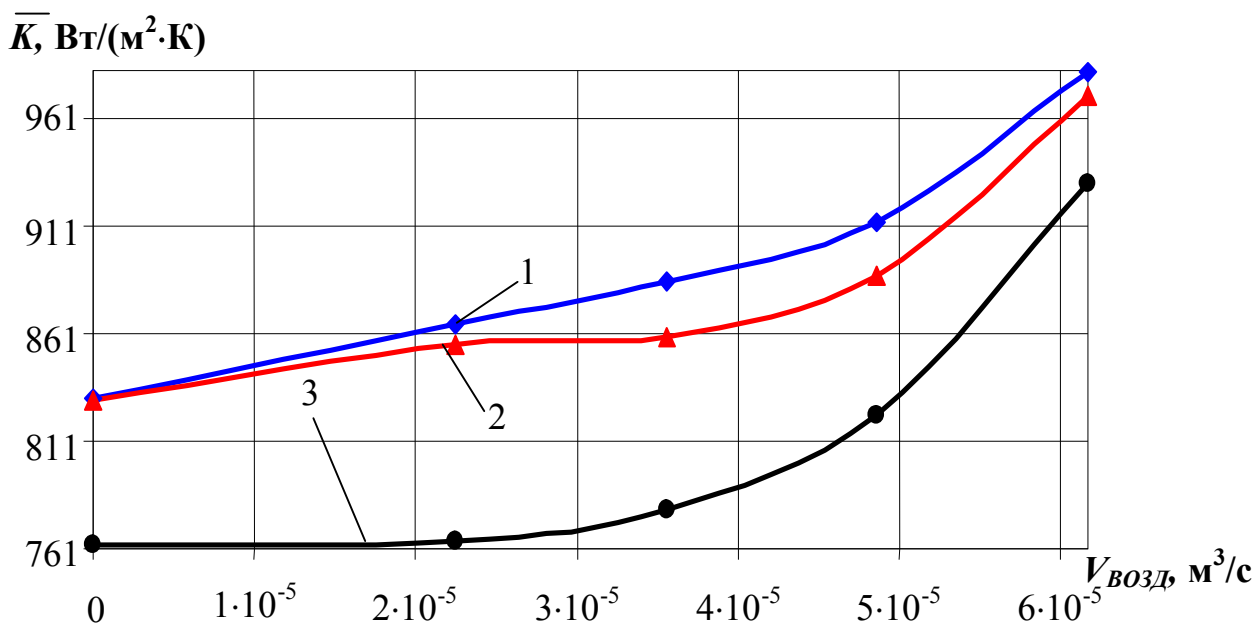


Рисунок 3.11 – Зависимость коэффициента  $\bar{K}$  от подачи воздуха  $V_{\text{ВОЗД}}$  при концентрировании раствора NaCl (8 % масс.),  $p = 96$  кПа,  $t_{B,H} = 100 \text{ °C}$ :

1 –  $V_H = 8,33 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ ; 2 –  $V_H = 1,39 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$ ; 3 –  $V_H = 1,94 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$

Анализ графических данных позволяет сказать, что коэффициент теплопередачи возрастает с увеличением значений величин  $V_{\text{ВОЗД}}$ ,  $t_{B,H}$  и глубины ва-

куума  $p$ , причем рост значений  $\overline{K}$  резко интенсифицируется при достижении  $V_{\text{ВОЗД}} = (3 \dots 4) \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$ . Максимальное значение величины  $\overline{K}_{\text{max}} = 982,351 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  было достигнуто при  $V_{\text{ВОЗД}} = 6,17 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $t_{\text{В.Н}} = 100 \text{ }^\circ\text{С}$ ,  $p = 96 \text{ кПа}$  и  $V_{\text{Н}} = 8,33 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ .

Показателем, характеризующим интенсивность теплоотдачи от теплоносителя к поверхности теплообмена в греющей рубашке РИИ, является усредненный коэффициент теплоотдачи  $\overline{\alpha}_2$ , который рассчитывался при обработке экспериментальных данных следующим образом:

- по формуле (3.18) рассчитывались значения коэффициента  $\overline{K}$ ;
- из выражения (1.5) определялась величина усредненного коэффициента теплоотдачи  $\overline{\alpha}_1$  от теплообменной поверхности к концентрируемому раствору, при расчетах производилась проверка критериев подобия, входящих в уравнение (1.5), на соответствие условиям (3.2);

- после подстановки полученных величин  $\overline{\alpha}_1$  и  $\overline{K}$  в выражение (3.1) и несложных арифметических преобразований последнего получали значения коэффициента  $\overline{\alpha}_2$ .

Зависимость коэффициента  $\overline{\alpha}_2$  от подачи воздуха представлена в виде графиков на рисунках 3.12 – 3.15.

Как видно из представленных графиков, с увеличением значений  $V_{\text{ВОЗД}}$  до  $(3 \dots 4) \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$  увеличение интенсивности теплоотдачи незначительно и составляет примерно  $40 \dots 50 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . При дальнейшем росте величины  $V_{\text{ВОЗД}}$  интенсивность теплоотдачи резко возрастает. Увеличение значений величин  $t_{\text{В.Н}}$  и  $p$  также ведет к увеличению значений коэффициента  $\overline{\alpha}_2$ .

Увеличение подачи исходного продукта приводит к уменьшению значений коэффициента  $\overline{\alpha}_2$ , причем это особенно проявляется при изменении величины подачи от  $1,39 \cdot 10^{-5}$  до  $1,94 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$ .

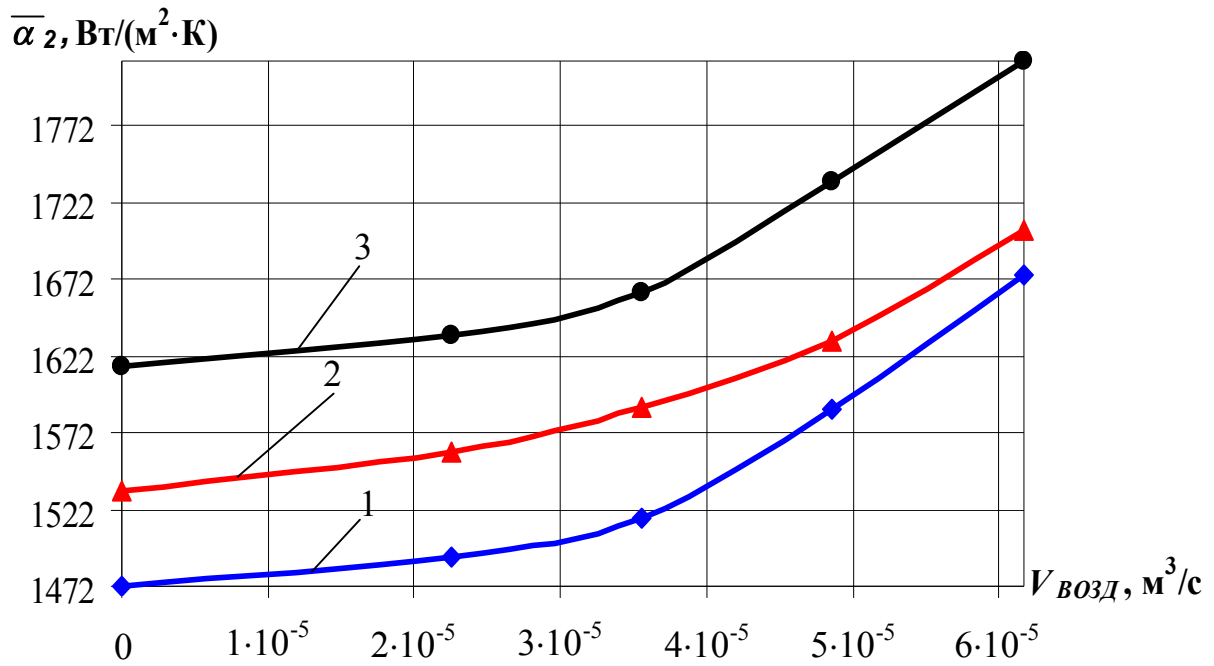


Рисунок 3.12 – Зависимость коэффициента  $\bar{\alpha}_2$  от расхода воздуха  $V_{\text{ВОЗД}}$  при концентрировании раствора NaCl (8 % масс.),  $p = 88$  кПа,  $V_H = 8,33 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ :  
 1 –  $t = 92^\circ\text{C}$ ; 2 –  $t = 96^\circ\text{C}$ ; 3 –  $t = 100^\circ\text{C}$

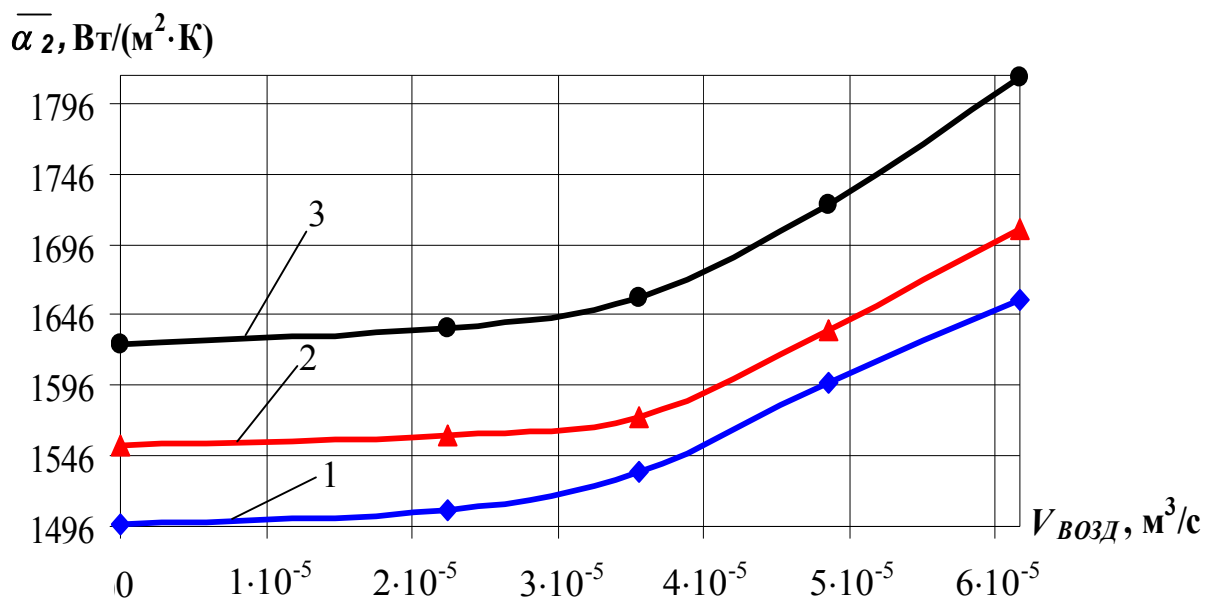


Рисунок 3.13 – Зависимость коэффициента  $\bar{\alpha}_2$  от расхода воздуха  $V_{\text{ВОЗД}}$  при концентрировании раствора NaCl (8 % масс.),  $p = 92$  кПа,  $V_H = 8,33 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ :  
 1 –  $t = 92^\circ\text{C}$ ; 2 –  $t = 96^\circ\text{C}$ ; 3 –  $t = 100^\circ\text{C}$

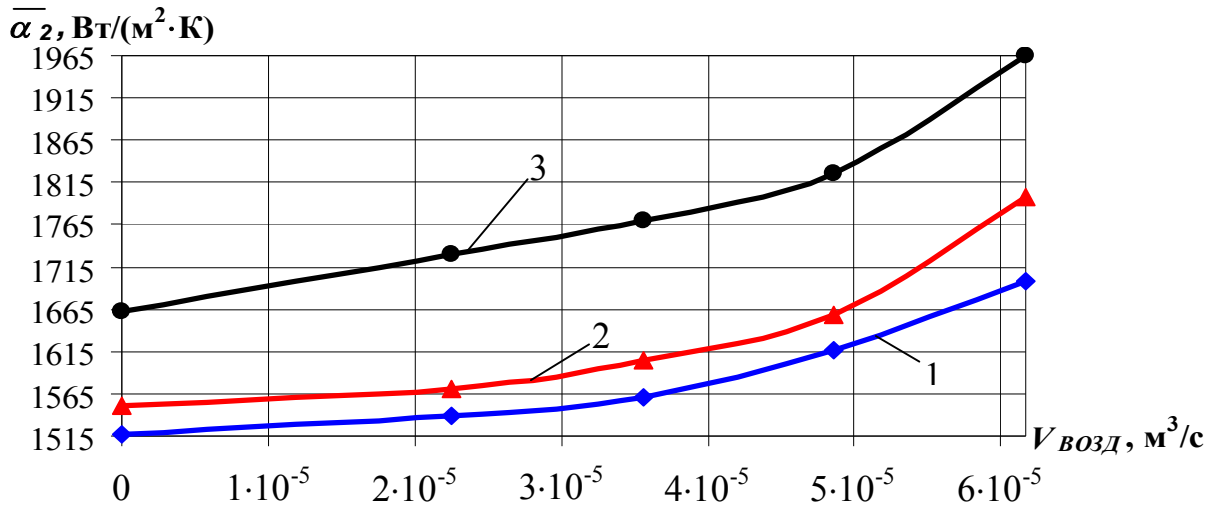


Рисунок 3.14 – Зависимость коэффициента  $\bar{\alpha}_2$ , от расхода воздуха  $V_{\text{ВОЗД}}$  при концентрировании раствора NaCl (8 % масс.),  $p = 96$  кПа,  $V_H = 8,33 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ :  
 1 –  $t = 92 \text{ }^\circ\text{C}$ ; 2 –  $t = 96 \text{ }^\circ\text{C}$ ; 3 –  $t = 100 \text{ }^\circ\text{C}$

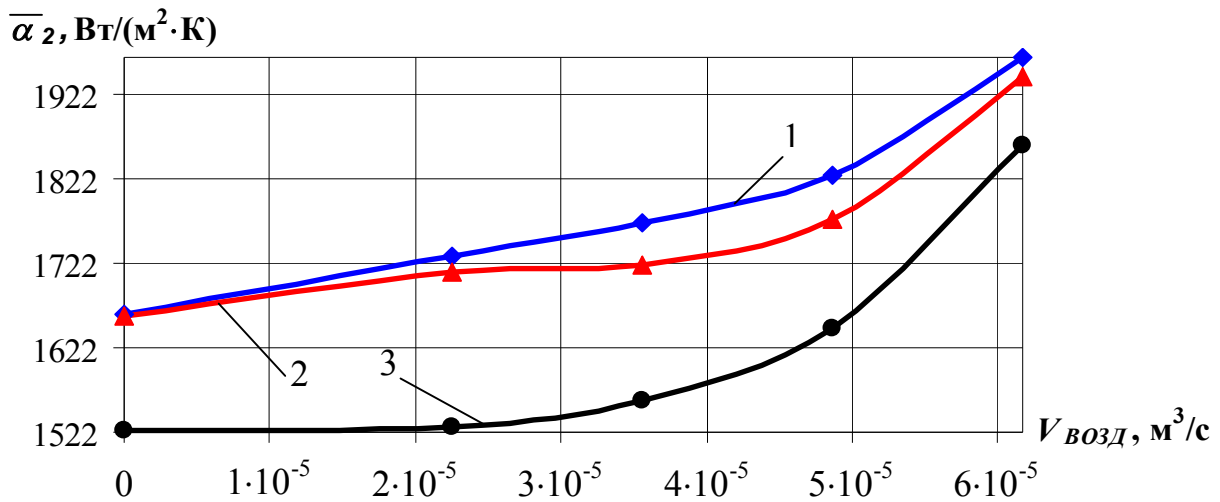


Рисунок 3.15 – Зависимость коэффициента  $\bar{\alpha}_2$  от подачи воздуха  $V_{\text{ВОЗД}}$  при концентрировании раствора NaCl (8 % масс.),  $p = 96$  кПа,  $t_{B,H} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ :  
 1 –  $V_H = 8,33 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ ; 2 –  $V_H = 1,39 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$ ; 3 –  $V_H = 1,94 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$

Максимального значения  $\bar{\alpha}_{2 \text{ max}} = 1964,701 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  величина коэффициента теплоотдачи достигает при следующих режимах:  $V_{\text{ВОЗД}} = 6,17 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $t_{B,H} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $p = 96$  кПа и  $V_H = 8,33 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ , это совпадает с условиями, обеспечивающими максимальное значение коэффициента теплопередачи  $\bar{K}_{\text{max}} = 982,351 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , изложенными на с. 85.

Проверка результатов проведенных экспериментов по материальному и энергетическому балансам показала, что расхождение расчетных и экспериментальных значений количества веществ, введенных в процесс и полученных по окончании процесса, не превышало  $\pm 5 \%$ , а величина энергетических потерь не превышала  $\pm 7 \%$ .

Для определения рациональных, с практической точки зрения, режимов деалкоголизации водно-спиртовых экстрактов в рамках данных экспериментальных исследований была проведена серия экспериментов на модельной жидкости (водно-спиртовом растворе с концентрацией  $C_{СП} = 5 \%$  об.).

При проведении данных экспериментов подача исходного продукта  $V_H$  принималась равной  $8,33 \cdot 10^{-6}$  и  $13,8 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/с, расход воздуха  $V_{ВОЗД} = 6,17 \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup>/с, подача греющего теплоносителя  $V_B = 8,33 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/с, глубина вакуума в аппарате  $p = 96$  кПа. Температура греющего агента на входе в РРИ  $t_{B,H}$  принималась равной 84 и 100 °С.

Критериями оценки рациональности режимов работы РРИ при деалкоголизации водно-спиртового раствора являлись количество проходов  $n$  продукта через аппарат для достижения полной деалкоголизации конечного продукта и концентрация спирта  $C_{СП,К}$  в конечном продукте после каждого прохода.

Результаты проведенных экспериментов представлены в приложении П 8 и на рисунке 3.16.

Анализируя данные, представленные на данном графике, можно сказать, что минимальное число проходов раствора через испаритель ( $n = 2$ ) было достигнуто при  $V_H = 8,3 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/с и  $t_{B,H} = 100$  °С (кривая 2 на рисунке 3.16), однако концентрация спирта в конечном продукте после первого прохода составила  $C_{СП,К} = 3,41 \%$  об. Такое высокое содержание спирта в конечном продукте можно объяснить тем, что на данных режимах работы РРИ наряду с испарением легкокипящего компонента (спирта) происходит интенсивное испарение воды, а это нежелательно при проведении деалкоголизации.

При деалкоголизации водно-спиртового раствора на режимах, представленных на графике кривыми 1, 3 и 4, достичь концентрации спирта  $C_{СП,К} = 0 \%$  об. в



конечном продукте удалось за три прохода, но наиболее рациональными с точки зрения деалкоголизации исходного раствора следует считать режимы  $V_H = 13,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$  и  $t_{B,H} = 84 \text{ }^\circ\text{C}$  (кривая 3 на рисунке 3.16), так как они обеспечивают минимальные значения концентрации спирта в конечном продукте по проходам, равные:

- на первом проходе –  $C_{сп.к} = 2,43 \text{ } \%$  об.;
- на втором проходе –  $C_{сп.к} = 1,32 \text{ } \%$  об.

Значения коэффициентов  $\varepsilon$ ,  $\bar{K}$ ,  $\bar{\alpha}_1$  и  $\bar{\alpha}_2$  для проведенных экспериментов рассчитывались соответственно по формулам (3.17), (3.18), (1.5) и (3.1), величина количества теплоты  $Q$ , переданной через поверхность теплообмена, определялась из выражения (3.19). Теплофизические и физикохимические свойства водно-спиртового раствора, необходимые для проведения данных расчетов, определялись из справочной литературы [64, 118]. Результаты расчетов приведены в приложении П 8.

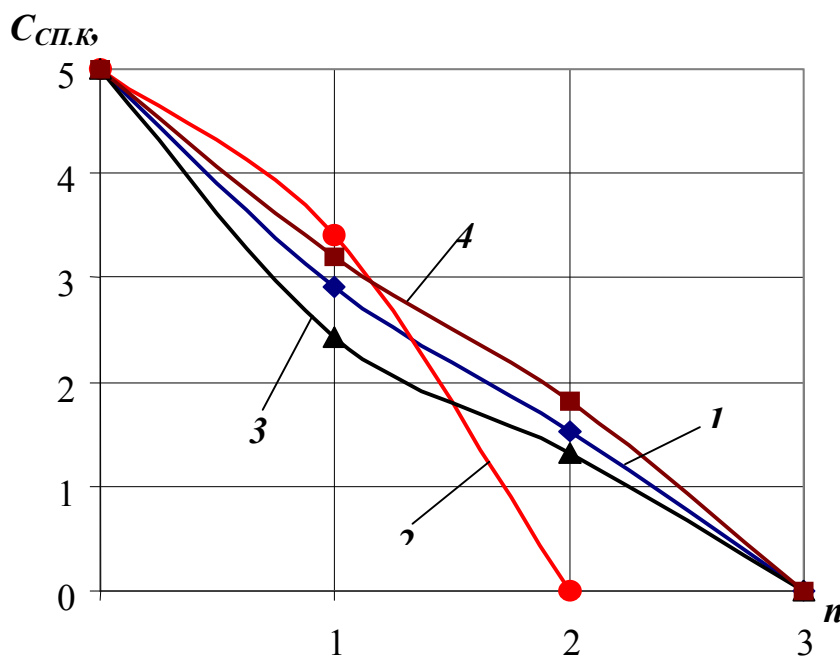


Рисунок 3. 16 – Зависимость концентрации спирта в конечном растворе  $C_{сп.к}$  от числа проходов через испаритель  $n$ :

- 1 –  $V_H = 8,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$  и  $t_{B,H} = 84 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- 2 –  $V_H = 8,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$  и  $t_{B,H} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- 3 –  $V_H = 13,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$  и  $t_{B,H} = 84 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- 4 –  $V_H = 13,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$  и  $t_{B,H} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$

На рисунках 3.17 – 3.19 представлены значения коэффициентов теплопередачи и теплоотдачи по проходам водно-спиртового раствора через РРИ.

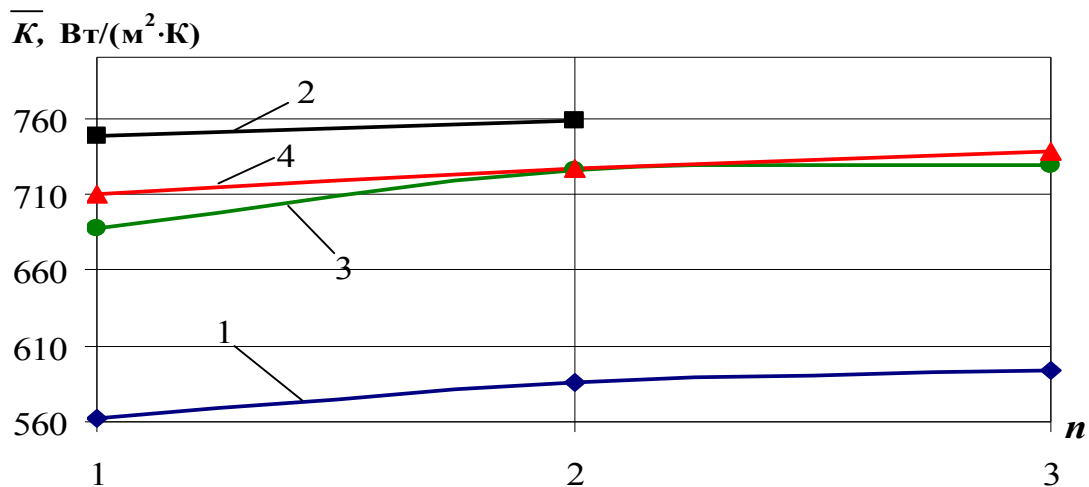


Рисунок 3.17 – Значения коэффициента теплопередачи  $\bar{K}$  по проходам водно-спиртового раствора через испаритель:

- 1 –  $V_H = 8,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$  и  $t_{B,H} = 84 \text{ °C}$ ;
- 2 –  $V_H = 8,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$  и  $t_{B,H} = 100 \text{ °C}$ ;
- 3 –  $V_H = 13,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$  и  $t_{B,H} = 84 \text{ °C}$ ;
- 4 –  $V_H = 13,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$  и  $t_{B,H} = 100 \text{ °C}$

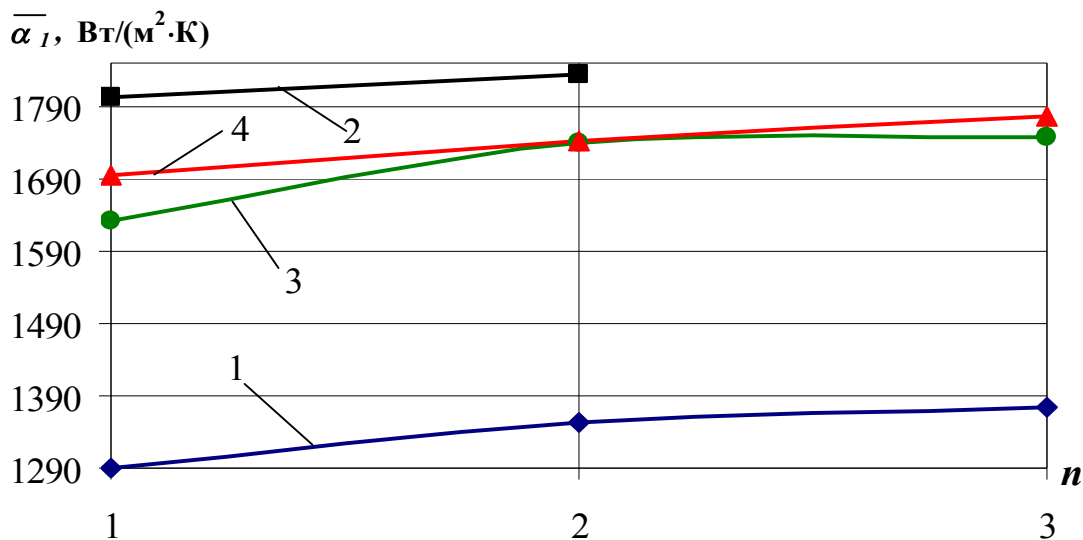


Рисунок 3.18 – Значения коэффициента теплоотдачи  $\bar{\alpha}_1$  по проходам водно-спиртового раствора через испаритель:

- 1 –  $V_H = 8,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$  и  $t_{B,H} = 84 \text{ °C}$ ;
- 2 –  $V_H = 8,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$  и  $t_{B,H} = 100 \text{ °C}$ ;
- 3 –  $V_H = 13,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$  и  $t_{B,H} = 84 \text{ °C}$ ;
- 4 –  $V_H = 13,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$  и  $t_{B,H} = 100 \text{ °C}$

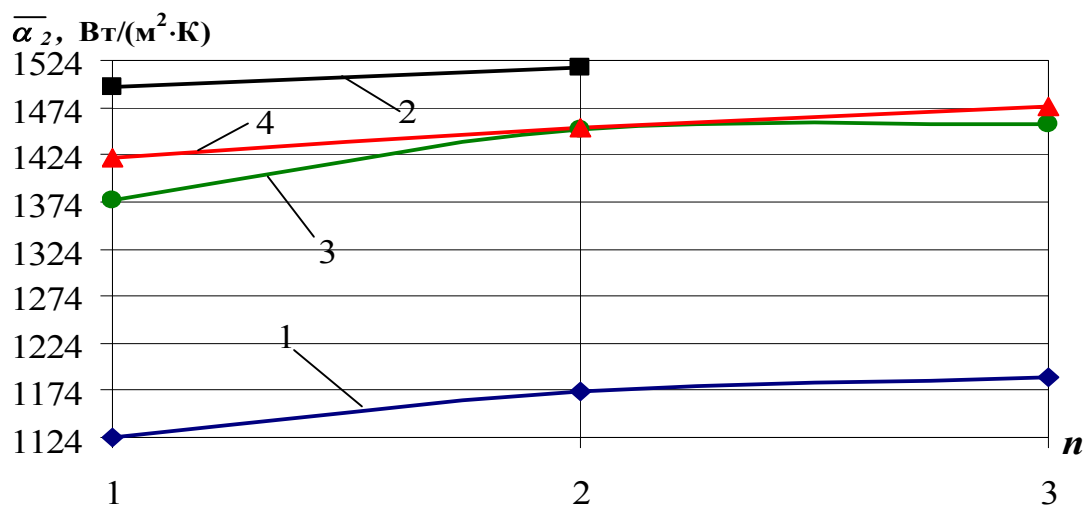


Рисунок 3.19 – Значения коэффициента теплоотдачи  $\bar{\alpha}_2$  по проходам водно-спиртового раствора через испаритель:

- 1 –  $V_H = 8,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$  и  $t_{B,H} = 84 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- 2 –  $V_H = 8,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$  и  $t_{B,H} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- 3 –  $V_H = 13,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$  и  $t_{B,H} = 84 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- 4 –  $V_H = 13,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$  и  $t_{B,H} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$

Как видно из представленных графиков, с уменьшением от прохода к проходу концентрации спирта в исходном растворе коэффициент теплопередачи  $\bar{K}$  возрастает. Максимальных значений коэффициент  $\bar{K}$  достигает при параметрах  $V_H = 8,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$  и  $t_{B,H} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ , что подтверждает выводы о влиянии подачи исходного продукта и температуры греющего агента на интенсивность теплопередачи в РРИ, полученные в результате анализа данных экспериментов по концентрированию водного раствора NaCl.

Рост коэффициента  $\bar{K}$  обусловлен как ростом коэффициента теплоотдачи на КЭ РРИ  $\bar{\alpha}_1$ , так и ростом коэффициента теплоотдачи в греющей рубашке  $\bar{\alpha}_2$ .

Проверка результатов проведенных экспериментов по материальному балансу показала, что расхождение расчетных и экспериментальных значений не превышает  $\pm 4 \%$ , а величина энергетических потерь, определенная из уравнения энергетического баланса, составляет не более  $\pm 8 \%$ .

Основной задачей данных экспериментальных исследований являлось определение рациональных, с практической точки зрения, режимов деалкоголи-

зации и концентрирования водно-спиртовых экстрактов боярышника кроваво-красного и калины обыкновенной в РРИ.

Для решения вышеуказанной задачи была проведена серия экспериментов по деалкоголизации и концентрированию следующих экстрактов:

- водно-спиртовой экстракт боярышника кроваво-красного  $C_{CB} = 16,6$  % масс.,  $C_{СП} = 43$  % об.;

- водно-спиртовой экстракт боярышника кроваво-красного  $C_{CB} = 9,6$  % масс.,  $C_{СП} = 8,69$  % об.;

- водно-спиртовой экстракт калины обыкновенной  $C_{CB} = 16,2$  % масс.,  $C_{СП} = 34,21$  % об.;

- водно-спиртовой экстракт калины обыкновенной  $C_{CB} = 9,7$  % масс.,  $C_{СП} = 14,14$  % об.

Режимы работы РРИ при проведении данных экспериментов были приняты с учетом данных, полученных в результате проведения экспериментов по концентрированию водного раствора хлористого натрия и деалкоголизации водно-спиртового раствора. Подача исходного продукта принималась равной  $V_H = (8,33 \dots 16,6) \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/с, подача горячей воды  $V_B = 8,33 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/с, расход воздуха  $V_{ВОЗД} = 6,17 \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup>/с, глубина вакуума в аппарате  $p = 96$  кПа. Температура греющего агента на входе в РРИ принималась равной  $t_{B,H} = 84$  °С и  $t_{B,H} = 100$  °С. Расход горячей воды –  $V_B = 8,33 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/с.

Критерием оценки рациональности режимов работы РРИ являлось количество проходов продукта через аппарат для достижения следующего: 1 – полной деалкоголизации продукта ( $C_{СП,К} = 0$ ); 2 – максимально возможного содержания сухих веществ в полученном концентрате  $C_{CB,К}$ .

Результаты проведенных экспериментов представлены в приложении П 8 и на рисунках 3.20 – 3.24.

Анализируя данные, представленные на графиках (рисунки 3.20 и 3.21), можно сказать, что минимальное число проходов через испаритель ( $n = 2$ ), до полной деалкоголизации, было достигнуто для экстрактов боярышника кроваво-красного ( $C_{CB} = 16,6$  % масс.,  $C_{СП} = 43$  % об., кривая 1 на рисунках 3.20 и

3.21) и калины обыкновенной ( $C_{CB} = 9,7$  % масс.,  $C_{СП} = 14,14$  % об., кривая 4 на рисунках 3.20 и 3.21) при следующих режимах:

- для экстракта боярышника – на первом проходе  $V_H = 16,6 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/с и  $t_{B,H} = 84$  °С, на втором проходе  $V_H = 13,8 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/с и  $t_{B,H} = 84$  °С;

- для экстракта калины на первом проходе –  $V_H = 8,33 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/с и  $t_{B,H} = 84$  °С, на втором проходе  $V_H = 8,33 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/с и  $t_{B,H} = 84$  °С. Концентрация сухих веществ в конечном продукте для этих экстрактов после трех проходов составила:

- для экстракта боярышника - 51,5 % масс.;

- для экстракта калины - 31 % масс.

Режимы работы РРИ на третьем проходе для обоих экстрактов составляли  $V_H = 8,33 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/с и  $t_{B,H} = 100$  °С.

Для сравнения, деалкоголизация экстракта калины с начальными концентрациями  $C_{CB} = 16,2$  % масс.,  $C_{СП} = 34,21$  % об. (кривая 3 на рисунках 3.20 и 3.21) была проведена за 3 прохода, а концентрация сухих веществ в конечном продукте после третьего прохода составила  $C_{CB,K} = 42,2$  % масс., при следующих режимных параметрах работы РРИ:

- первый проход –  $V_H = 12,5 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/с и  $t_{B,H} = 84$  °С;

- второй проход –  $V_H = 16,6 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/с и  $t_{B,H} = 84$  °С;

- третий проход –  $V_H = 12,5 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/с и  $t_{B,H} = 84$  °С.

Деалкоголизация экстракта боярышника с начальными концентрациями  $C_{CB} = 9,6$  % масс.,  $C_{СП} = 8,69$  % об. (кривая 2 на рисунке 3.20 и 3.21) была проведена за 3 прохода, а концентрация сухих веществ в конечном продукте после третьего прохода составила  $C_{CB,K} = 16,4$  % масс., при следующих режимных параметрах работы РРИ:

- первый проход -  $V_H = 16,6 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/с и  $t_{B,H} = 84$  °С;

- второй проход -  $V_H = 16,6 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/с и  $t_{B,H} = 84$  °С;

- третий проход -  $V_H = 16,6 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/с и  $t_{B,H} = 84$  °С.

Исходя из проведенного анализа, наиболее рациональными режимами переработки экстрактов являются:

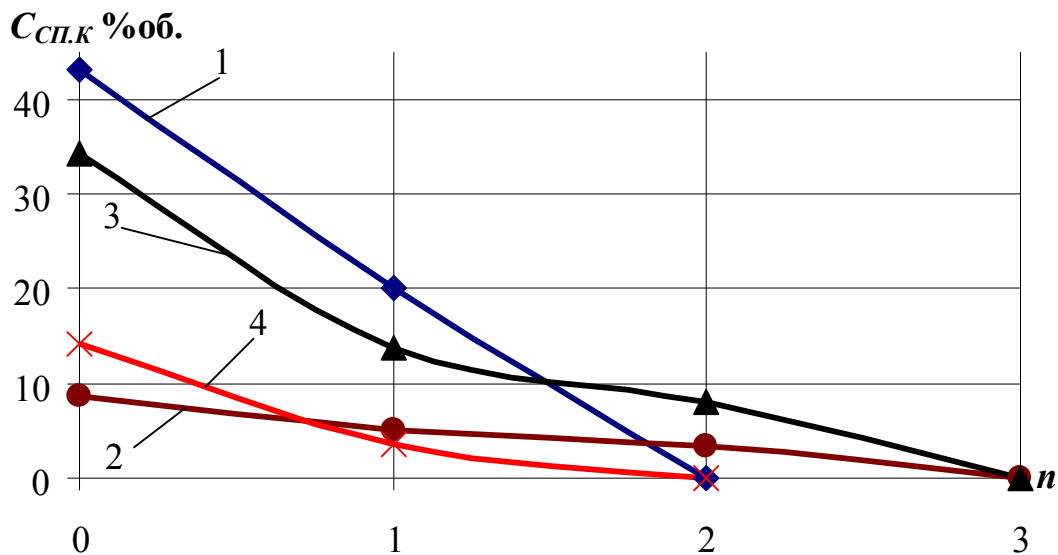


Рисунок 3.20 – Влияние числа проходов  $n$  экстракта через испаритель на концентрацию спирта  $C_{СП,К}$  в концентрате:

- 1 – экстракт боярышника  $C_{СВ} = 16,6$  % масс.,  $C_{СП} = 43$  % об.;
- 2 – экстракт боярышника  $C_{СВ} = 9,6$  % масс.,  $C_{СП} = 8,69$  % об.;
- 3 – экстракт калины  $C_{СВ} = 16,2$  % масс.,  $C_{СП} = 34,21$  % об.;
- 4 – экстракт калины  $C_{СВ} = 9,7$  % масс.,  $C_{СП} = 14,14$  % об.

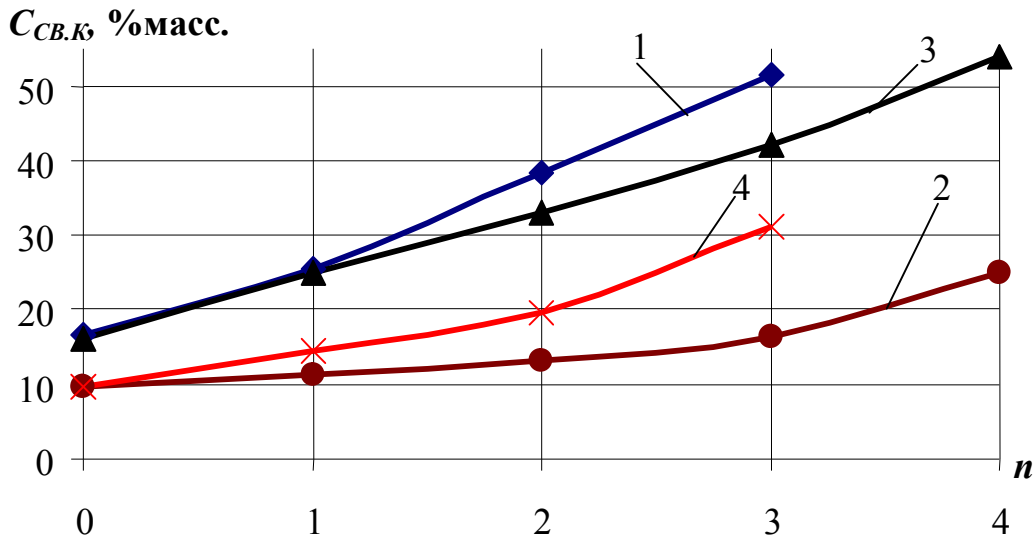


Рисунок 3.21 – Влияние числа проходов  $n$  экстракта через испаритель на концентрацию сухих веществ  $C_{СВ,К}$  в концентрате:

- 1 – экстракт боярышника  $C_{СВ} = 16,6$  % масс.,  $C_{СП} = 43$  % об.;
- 2 – экстракт боярышника  $C_{СВ} = 9,6$  % масс.,  $C_{СП} = 8,69$  % об.;
- 3 – экстракт калины  $C_{СВ} = 16,2$  % масс.,  $C_{СП} = 34,21$  % об.;
- 4 – экстракт калины  $C_{СВ} = 9,7$  % масс.,  $C_{СП} = 14,14$  % об.

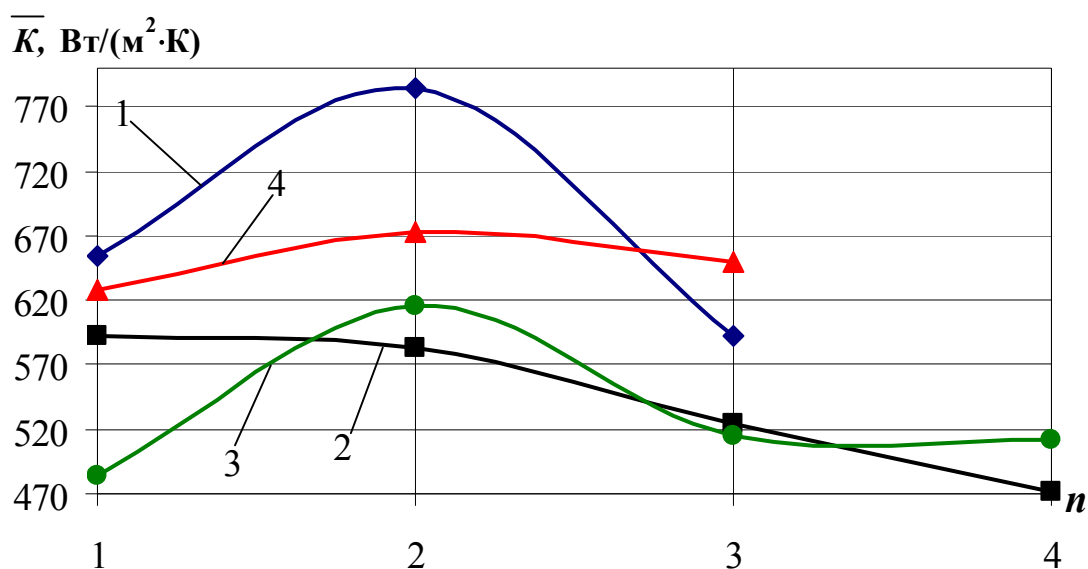


Рисунок 3.22 – Значения коэффициента теплопередачи  $\bar{K}$  по проходам экстрактов через РРИ:

- 1 – экстракт боярышника  $C_{CB} = 16,6$  % масс.,  $C_{СП} = 43$  % об.;
- 2 – экстракт боярышника  $C_{CB} = 9,6$  % масс.,  $C_{СП} = 8,69$  % об.;
- 3 – экстракт калины  $C_{CB} = 16,2$  % масс.,  $C_{СП} = 34,21$  % об.;
- 4 – экстракт калины  $C_{CB} = 9,7$  % масс.,  $C_{СП} = 14,14$  % об.

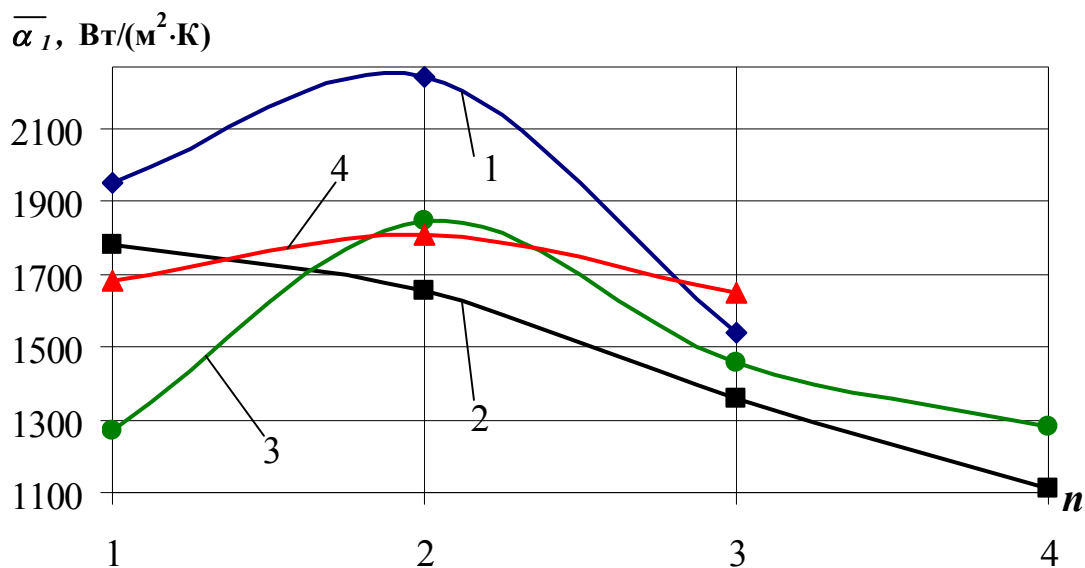


Рисунок 3.23 – Значения коэффициента теплоотдачи  $\bar{\alpha}_1$  по проходам экстрактов через РРИ:

- 1 – экстракт боярышника  $C_{CB} = 16,6$  % масс.,  $C_{СП} = 43$  % об.;
- 2 – экстракт боярышника  $C_{CB} = 9,6$  % масс.,  $C_{СП} = 8,69$  % об.;
- 3 – экстракт калины  $C_{CB} = 16,2$  % масс.,  $C_{СП} = 34,21$  % об.;
- 4 – экстракт калины  $C_{CB} = 9,7$  % масс.,  $C_{СП} = 14,14$  % об.

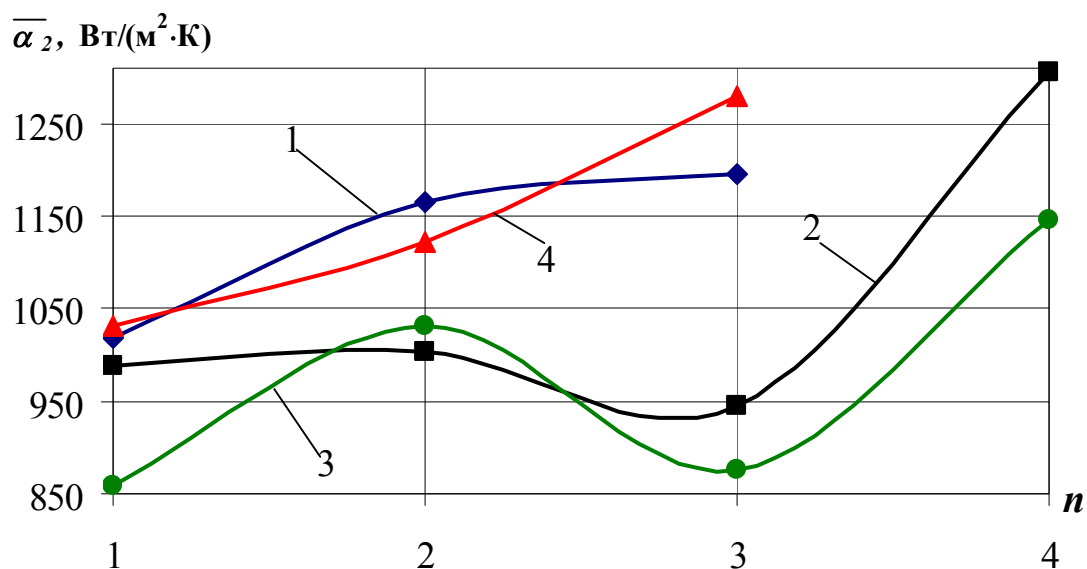


Рисунок 3.24 – Значения коэффициента теплоотдачи  $\bar{\alpha}_2$  по проходам экстрактов через РПИ:

- 1 – экстракт боярышника  $C_{CB} = 16,6$  % масс.,  $C_{СП} = 43$  % об.;
- 2 – экстракт боярышника  $C_{CB} = 9,6$  % масс.,  $C_{СП} = 8,69$  % об.;
- 3 – экстракт калины  $C_{CB} = 16,2$  % масс.,  $C_{СП} = 34,21$  % об.;
- 4 – экстракт калины  $C_{CB} = 9,7$  % масс.,  $C_{СП} = 14,14$  % об.

- для экстрактов с высокими концентрациями спирта и сухих веществ, при деалкоголизации – температура теплоносителя на входе  $t_{B,H} = 84$  °С, подача исходного продукта  $V_H = (13,8 \dots 16,6) \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/с, при концентрировании – температура теплоносителя на входе  $t_{B,H} = 100$  °С, подача исходного продукта  $V_H = (8,33 \dots 11,1) \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/с.;

- для экстрактов с низкими концентрациями спирта и сухих веществ, при деалкоголизации – температура теплоносителя на входе  $t_{B,H} = 84$  °С, подача исходного продукта  $V_H = (8,33 \dots 11,1) \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/с, при концентрировании – температура теплоносителя на входе  $t_{B,H} = 100$  °С, подача исходного продукта  $V_H = (8,33 \dots 11,1) \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/с.

Подачу воздуха в греющий теплоноситель и глубину вакуума в аппарате рекомендуется принимать равными  $p = 96$  кПа,  $V_{ВОЗД} = 6,17 \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup>/с, подачу греющего теплоносителя –  $V_B = 8,33 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/с.

Значения коэффициентов  $\varepsilon$ ,  $\bar{K}$ ,  $\bar{\alpha}_1$  и  $\bar{\alpha}_2$  для проведенных экспериментов рассчитывались соответственно по формулам (3.17), (3.18), (1.5) и (3.1), вели-



чина количества теплоты  $Q$ , переданной через поверхность теплообмена, определялась из выражения (3.19).

Результаты данных расчетов приведены в приложении П 8 и на рисунках 3.22 – 3.24.

Анализ данных графиков позволяет сказать, что коэффициент теплопередачи  $\bar{K}$  достигает максимальных значений при режимах деалкоголизации и концентрирования экстрактов, представленных на графиках кривыми 1 и 4.

Коэффициент теплоотдачи  $\bar{\alpha}_1$  на стадии деалкоголизации возрастает, а затем, с уменьшением  $C_{СП}$  и увеличением  $C_{СВ}$  от прохода к проходу, имеет тенденцию к уменьшению, а коэффициент  $\bar{\alpha}_2$  увеличивается.

Проверка результатов проведенных экспериментов по материальному и энергетическому балансам показала, что расхождение расчетных и экспериментальных значений количества веществ, введенных в процесс и полученных по окончании процесса, не превышало  $\pm 7\%$  по сухим веществам и  $\pm 4\%$  по спирту, а величина энергетических потерь не превышала  $\pm 7\%$ .

Максимальные значения коэффициента теплопередачи, полученные при проведении деалкоголизации и концентрирования экстрактов боярышника кроваво-красного и калины обыкновенной на рекомендуемых режимах, лежат в пределах  $\bar{K} = (592,51 \dots 783,83)$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Для сравнения, в работе [106], при деалкоголизации водно-спиртовых экстрактов красной рябины и красной смородины, коэффициент теплопередачи составлял  $559,7 \dots 746,5$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), а в работе [112], при деалкоголизации и концентрировании водно-спиртовых экстрактов в РРИ средние значения коэффициентов теплопередачи составляют  $507 \dots 728$  Вт/(м<sup>2</sup>·К).

По данным, полученным в результате проведения описанных выше экспериментов, в среде пакета программ «STATISTICA-6,0» [7], с применением методов статистического анализа построена статистическая модель, описывающая зависимость коэффициента теплоотдачи  $\bar{\alpha}_2$  в греющей рубашке РРИ от входных параметров:

$$\bar{\alpha}_2 = -1296,69 - 16,33 \cdot V_{\text{ВОЗД}} + 30,18 \cdot t_{\text{ВН}}, \quad (3.21)$$

при  $R=95,98 \%$ ,

где  $R$  – коэффициент множественной корреляции, который показывает, что модель приспособлено объясняет 95,98 % изменчивости коэффициента теплоотдачи.

Результаты статистического анализа по исследованию коэффициента теплоотдачи в греющей рубашке РРИ при dealкоголизации и концентрировании пищевых смесей представлены в приложении П 9.

Отклонение значений коэффициента теплоотдачи, рассчитанных по уравнению (3.21) и полученных экспериментально, не превышает 19,47 %. Корреляционный график опытных и расчетных данных представлен на рисунке 3.25.

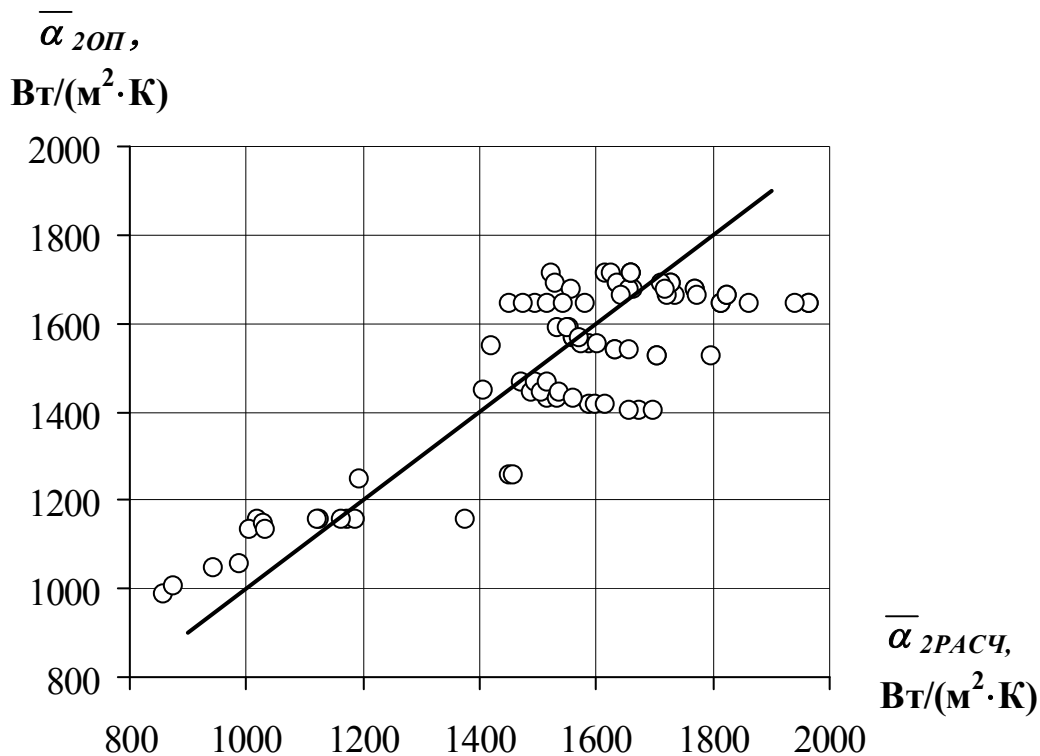


Рисунок 3.25 – Сопоставление опытных  $\bar{\alpha}_{2\text{ОП}}$  и расчетных  $\bar{\alpha}_{2\text{РАСЧ}}$  значений коэффициента теплоотдачи

Уравнение (3.21) справедливо для использованных в экспериментах модельных жидкостей при  $V_B = 8,33 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$  в следующих диапазонах входных параметров:  $C_{CB} = 0 \dots 42 \%$  масс.,  $C_{СП} = 0 \dots 43 \%$  об.,  $t_{\text{ВН}} = 84 \dots 100 \text{ }^\circ\text{С}$ ,  $p = 88 \dots 96 \text{ кПа}$ ,  $V_H = (8,33 \dots 19,4) \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $V_{\text{ВОЗД}} = (0 \dots 6,17) \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$  – и

может быть рекомендовано для практических расчетов коэффициента теплоотдачи  $\bar{\alpha}_2$ .

### 3.5 Выводы по главе

1 Определен необходимый для обеспечения стабильного режима работы данного РРИ начальный объем исходного продукта.

2 Исследовано влияние подачи воздуха в горячий теплоноситель на интенсивность теплообмена в роторном распылительном испарителе при переработке жидких пищевых смесей в диапазоне  $V_{\text{возд}} = (0 \dots 6,17) \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ .

3 Установлены рациональные параметры и режимы процесса деалкоголизации и концентрирования водно-спиртовых экстрактов боярышника кроваво – красного и калины обыкновенной.

4 Построена статистическая модель, описывающая зависимость коэффициента теплоотдачи в греющей рубашке РРИ от входных режимных параметров.

5 В результате выполненных исследований доказана эффективность и целесообразность турбулизации греющего агента воздухом в РРИ при деалкоголизации и концентрировании экстрактов из плодово-ягодного сырья.

# ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА И РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ПРАКТИЧЕСКОМУ ПРИМЕНЕНИЮ РОТОРНОГО РАСПЫЛИТЕЛЬНОГО ИСПАРИТЕЛЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ПЛОДОВО-ЯГОДНЫХ ЭКСТРАКТОВ

## 4.1 Разработка методики расчета

В предыдущей главе показана принципиальная возможность использования РРИ для концентрирования пищевых продуктов, из чего следует целесообразность разработки рекомендаций по расчету и конструированию РРА для процессов упаривания под вакуумом жидких пищевых продуктов.

При разработке рекомендаций использованы как результаты настоящей работы, так и данные, опубликованные в работах [86, 87, 106, 112].

Расчет и конструирование РРИ целесообразно осуществлять в следующей последовательности.

1 По заданному расходу исходного продукта  $G_{II}$  (кг/с), его начальной  $C_{II}^H$  и конечной  $C_{II}^K$  концентрациям (%масс.) определяется количество растворителя, подлежащего испарению [64] (кг/с):

$$G_{\text{конд}} = \left(1 - \frac{C_{II}^H}{C_{II}^K}\right) \cdot G_{II}. \quad (4.1)$$

2 При деалкоголизации и концентрировании водно-спиртовых плодово-ягодных экстрактов из уравнения материального баланса по выпариваемому растворителю определяется концентрация спирта в водно-спиртовом конденсате [34] (%масс.):

$$C_{СП} = (G_{II} C_{СП}^H - (G_{II} - G_{\text{конд}}) C_{СП}^K) / G_{\text{конд}}, \quad (4.2)$$

где  $C_{СП}^H$  и  $C_{СП}^K$  – соответственно содержание спирта в исходном и сконцентрированном продукте (% масс.).

3 Из уравнения материального и теплового баланса определяется количество тепла, переданного через стенку испарителя от греющего агента к упариваемому раствору:

$$Q = Q_K + Q_{\text{КОНД}} + Q_{\text{ПОТ}} = G_{\text{П}}^K \cdot c_{\text{П}}^K \cdot t_K + G_{\text{КОНД}} i_{\text{КОНД}} + Q_{\text{ПОТ}}, \quad (4.3)$$

где  $Q_K$  – количество тепла, отводимого из процесса с упаренным продуктом, Вт;  $Q_{\text{КОНД}}$  – затраты тепла на испарение продукта, Вт;  $Q_{\text{ПОТ}}$  – потери тепла (10% от  $Q_K + Q_{\text{КОНД}}$ ), Вт;  $G_{\text{П}}^K$  и  $G_{\text{КОНД}}$  – производительность РРИ по концентрату и конденсату соответственно, кг/с;  $c_{\text{П}}^K$  – удельная теплоемкость сконцентрированного продукта, Дж/(кг·К);  $t_K$  – температура сконцентрированного продукта на выходе из аппарата;  $i_{\text{КОНД}}$  – удельная энтальпия растворителя.

Для водно-спиртовой смеси теплота парообразования растворителя определяется из выражения (3.20) [40]:

$$r_{\text{КОНД}} = b \cdot i_{\text{СП}} + (1-b) \cdot i_{\text{В}},$$

где  $i_{\text{СП}}$  и  $i_{\text{В}}$  – соответственно удельные энтальпии спирта и воды при температуре  $(t_{\text{П}}' + t_{\text{П}}'')/2$ ;  $b$  – массовая доля спирта в конденсате.

Температура кипения продукта в верхней –  $t_{\text{П}}'$  и нижней –  $t_{\text{П}}''$  частях испарителя определяется составом, свойствами продукта, растворенных в нем сухих веществ и содержанием спирта.

4 Выполненные в разделе 3.3 исследования показали возможность использования в качестве греющего агента в РРИ горячей воды с начальной температурой  $t_{\text{ВН}} = (84 \dots 100)$  °С. При этом температурный напор в верхней  $\Delta t_{\text{Н}}$  и нижней  $\Delta t_{\text{К}}$  частях испарителя должен поддерживаться в пределах  $0,6 \leq (\Delta t_{\text{Н}}/\Delta t_{\text{К}}) \leq 0,8$ . Исходя из этого условия определяется температура воды на выходе из рубашки испарителя.

5 Исходя из затрат тепла на нагрев концентрата и испарение растворителя по уравнению теплового баланса определяется расход горячей воды (кг/с):

$$G_{\text{В}} = \frac{Q - Q_{\text{Н}}}{c_{\text{В}}^{\text{Н}} \cdot t_{\text{В}}^{\text{Н}} - c_{\text{В}}^{\text{К}} \cdot t_{\text{В}}^{\text{К}}}, \quad (4.4)$$

где  $Q_{\text{Н}}$  – количество тепла, вносимое в процесс исходным продуктом, Вт;  $c_{\text{В}}^{\text{Н}}$  и  $c_{\text{В}}^{\text{К}}$  – соответственно теплоемкость воды на входе и на выходе аппарата, Дж/(кг·К);  $t_{\text{В}}^{\text{Н}}$  и  $t_{\text{В}}^{\text{К}}$  – соответственно температура воды на входе и на выходе аппарата, °С.

6 Необходимая площадь поверхности теплопередачи определяется по уравнению [34]:

$$F = \frac{Q}{\bar{K} \cdot \Delta t_{CP}}, \quad (4.5)$$

где  $\bar{K}$  – усредненный коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\Delta t_{CP}$  – средняя разница температур между греющим теплоносителем и упариваемым раствором [33, 34, 64], °С.

Коэффициент теплопередачи вычисляется по уравнению (3.1) и зависит от коэффициента теплоотдачи от поверхности стенки к кипящему раствору –  $\bar{\alpha}_1$  и от коэффициента теплоотдачи от греющего теплоносителя к внутренней поверхности стенки испарителя –  $\bar{\alpha}_2$ . Расчет коэффициента теплоотдачи  $\bar{\alpha}_1$  проводится по уравнению (1.5) с обязательной проверкой соответствия критериев подобия, входящих в это уравнение, условиям (3.2). Расчет коэффициента теплоотдачи  $\bar{\alpha}_2$  – по уравнению (3.21).

7 Диапазон удельной нагрузки РРИ по жидкой фазе определяется выражением [87, 106]:

$$V_H/F_K = (5 \dots 40) \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с}), \quad (4.6)$$

где  $V_H$  – объемная подача исходного продукта, м<sup>3</sup>/с;  $F_K = (0,785 \cdot D_K)$  – площадь сечения КЭ, м<sup>2</sup>;  $D_K$  – диаметр КЭ, м.

Из условия (4.6) в первом приближении находится диаметр РРИ. При этом необходимо провести проверку выбранного диаметра испарителя по выражению (4.6) для нижнего КЭ испарителя, поскольку вследствие испарения растворителя количество стекающего по РРИ упариваемого раствора уменьшается.

8 Диаметр диспергирующего устройства следует принимать таким, чтобы обеспечить летящие капли запасом энергии, достаточным для достижения стенки испарителя. Рекомендуется принимать  $D_P = (0,25 \dots 0,33) \cdot D_K$  [86, 106].

9 Определяется скорость истечения жидкости из отверстий диспергирующего устройства по формулам [106]

$$\left. \begin{aligned} U_K &= \sqrt{U_0^2 + U_\varphi^2}; \\ U_0 &= \omega \cdot R_P; \\ U_\varphi &= \varphi \cdot \omega \cdot \sqrt{R_P^2 - r_{с.п.}^2} \end{aligned} \right\}, \quad (4.7)$$

где  $U_K$ ,  $U_0$  и  $U_\varphi$  – соответственно абсолютная, окружная и относительная скорость жидкости, м/с;  $\omega$  – угловая скорость распылителя, рад/с;  $R_P = D_P/2$  – радиус диспергирующего устройства, м;  $r_{с.п.}$  – радиус свободной поверхности внутри диспергирующего устройства, м;  $\varphi$  – коэффициент скорости, для цилиндров с толщиной стенки  $\delta = (0,4 \dots 2,0) \cdot d_0$ , рекомендуется принимать  $\varphi = 0,73$ , а при  $\delta \leq (0,3 \cdot d_0)$   $\varphi = 0,62$  [106].

9.1 Диаметр диспергирующих отверстий рекомендуется принимать  $d_0 = (1,5 \dots 2,0) \cdot 10^{-3}$  м [106].

9.2 Выбор частоты вращения диспергирующего устройства следует производить с учетом результатов исследований, проведенных в работе [106], в которой определено, что для достижения максимальной эффективности РРИ на КЭ целесообразно генерировать капли диаметром более 1 мм, а также даны рекомендации по определению частоты вращения распылителя.

10. Удельный расход воздуха на единицу расхода горячей воды определяется по данным экспериментов, описанных в главе 3, как отношение

$$V_{\text{возд}}/V_B = 0,074 \text{ (м}^3\text{/с)/(м}^3\text{/с)}, \quad (4.8)$$

где  $V_{\text{возд}}$  и  $V_B$  – соответственно объемные расходы воздуха и горячей воды, (м<sup>3</sup>/с).

Расчет конструкции РРИ, а в частности расчет параметров заборного устройства, конструкции сливной тарелки, высоты и конструкции контактного элемента, выбор числа КЭ, приведен в работах [22, 86]. В работе [112] приведена блок - схема расчета основных параметров РРИ.

## **4.2 Разработка рекомендаций по использованию РРИ для деалкоголизации и концентрирования водно-спиртовых плодово-ягодных экстрактов**

Полученные результаты экспериментальных исследований позволили разработать технологическую схему производства экстрактов из плодово-ягодного сырья боярышника кроваво-красного и калины обыкновенной (рисунок 4.1).

При приемке сырья определяется его количество и качество в соответствии со стандартами или техническими условиями [19, 81, 83]. При сортировке плодов и ягод удаляют сор, чашелистики, а также недоброкачественные плоды и ягоды. Недопустимо перерабатывать гнилые и плесневелые плоды и ягоды. Сроки хранения свежего плодово-ягодного сырья ограничены. Предельная длительность хранения – 7 суток [8], т.к. плоды боярышника кроваво-красного и калины обыкновенной содержат почти 90 % влаги, нестойки при хранении и являются хорошим субстратом для развития плесени, дрожжей и многих других микроорганизмов. Наиболее распространенными методами хранения плодово-ягодного сырья для производства экстрактов являются его замораживание либо сушка. Процесс хранения сушеного плодово-ягодного сырья является наиболее простым и не требует дополнительных затрат (в отличие от хранения ягод в замороженном виде). Сухие плоды и ягоды сохраняются длительное время (до получения нового урожая), не теряя в процессе хранения своих полезных свойств [46, 47, 48, 59, 113, 119].

Для хранения плодово-ягодное сырье высушивается при комнатной температуре либо в сушильных шкафах до содержания влаги не более 14% [19].

После сушки у плодов боярышника кроваво-красного и ягод калины обыкновенной производится удаление плодоножек, а затем они подвергаются измельчению. Следует учесть, что при мелком измельчении увеличивается площадь поверхности контакта фаз при экстрагировании, но усложняется процесс отделения настоев от отработанного сырья, требуется дополнительная фильтрация, а следовательно, возникают дополнительные потери спирта.



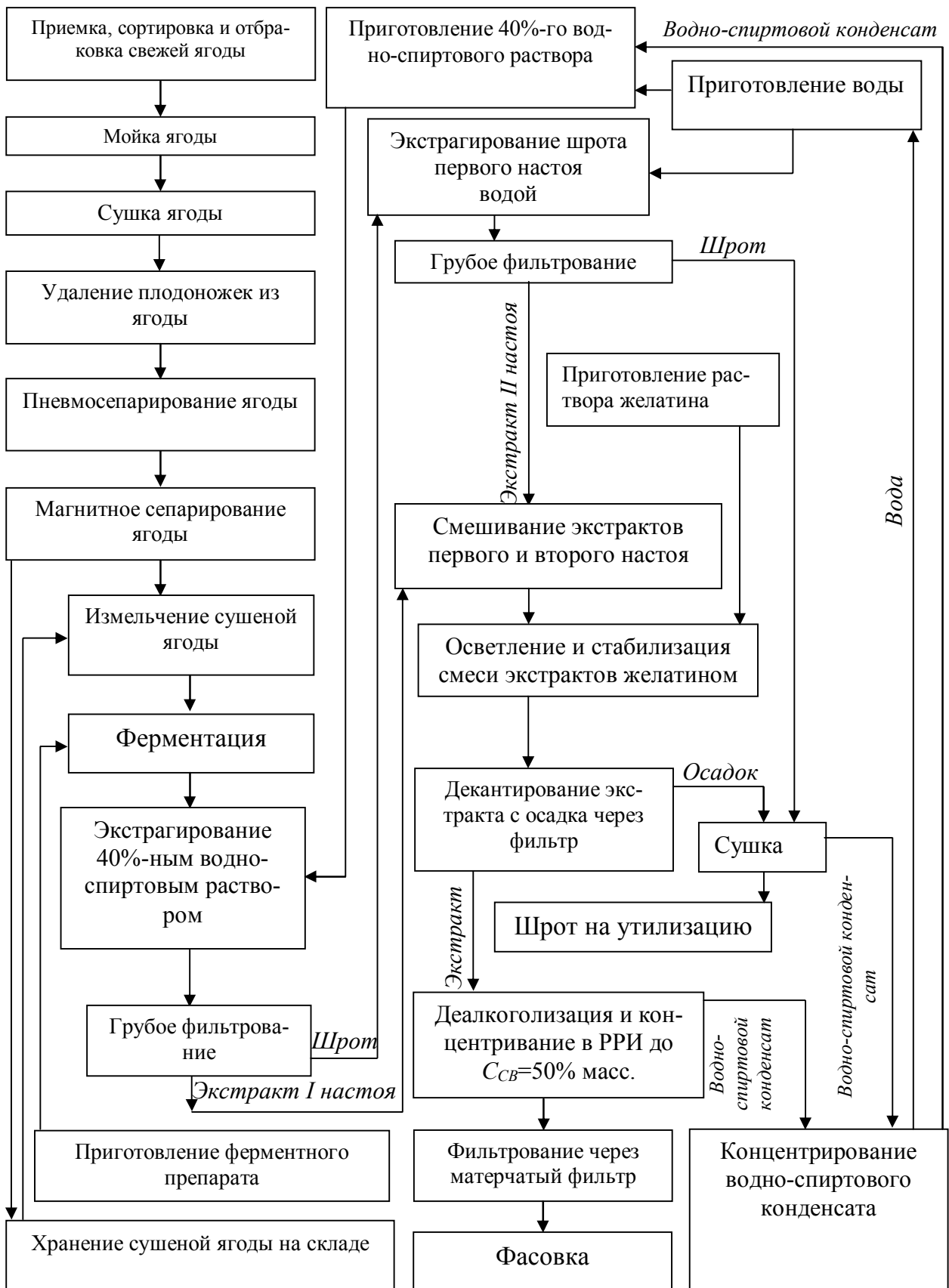


Рисунок 4.1 – Технологическая схема производства концентрированных экстрактов из плодов боярышника кроваво-красного и ягод калины обыкновенной

Экстракты, характеризующиеся высоким содержанием спирта и сахара, практически не подвержены помутнениям биологического характера. Однако наличие солей органического характера создает предпосылки к помутнениям физико-химического характера. Эти изделия представляют собой сложную коллоидную систему, равновесие которой при определенных условиях может нарушиться, что повлечет за собой появление мути и в дальнейшем – осадка [76]. Для предотвращения этого, а также в целях депектинизации плодово-ягодного сырья, для повышения выхода сухих растворимых веществ в измельченную массу добавляется ферментный препарат пектофоедин П10Х [76] 0,02 % от массы мезги в пересчете на стандартную активность 9 ед/г. Продолжительность обработки мезги при постоянном перемешивании 1-2 часа [106]. Оптимальная температура действия пектолитических ферментных препаратов 35...45 °С [76, 83].

Для приготовления водно – спиртовых растворов этиловый спирт и вода смешиваются в количестве, необходимом для получения раствора заданной концентрации  $C_{СП} = 40\%$  об.

Для экстрагирования используется способ двукратного настаивания (мацерация) [8, 23, 132]. Первое настаивание осуществляется водно-спиртовым раствором, второе – водой. Для приготовления экстракта первого настоя в аппарат загружается подготовленное плодово-ягодное сырье, которое заливается водно-спиртовым раствором. Соотношение сырья и раствора 1:1,5 (по массе) – боярышник кроваво-красный, 1:2 – калина обыкновенная. Длительность настаивания составляет от 3 до 14 дней при ежедневном перемешивании.

При приготовлении экстракта второго настоя соотношение сырья и воды 1:1 (по массе) – боярышник кроваво-красный, 1:2 – калина обыкновенная. Длительность настаивания экстракта второго слива до 10 дней при ежедневном перемешивании.

Также можно проводить экстрагирование в аппаратах интенсивного типа, например [31, 60] с вибрационной тарелкой, в этом случае время на экстрагирование сокращается до 20-30 минут.

Далее экстракт поступает в шнековый пресс, где осуществляется грубое фильтрование и отжим шрота. После чего экстракт направляется в смеситель, а шрот первого настоя на повторное экстрагирование в экстрактор.

После извлечения из шрота водой остатков спирта и полезных веществ экстракт второго настоя поступает на грубое фильтрование в шнековый пресс, откуда отжатый шрот направляется на сушку, а экстракт второго настоя в смеситель на смешивание с экстрактом первого настоя.

Полученный после смешения экстракт направляется на осветление желатином. Дозировку желатина уточняют предварительной пробной оклейкой [8, 76].

После перемешивания экстракта с раствором желатина смесь выдерживается в покое в течение 6 - 10 часов для уплотнения осадка. Затем экстракт декантируется с осадка и направляется на тонкое фильтрование в фильтр-пресс. После фильтрования экстракт должен быть хорошо осветленным и выдерживать тест к коллоидным помутнениям [76]. Осадок, полученный после тонкого фильтрования, направляется на сушку совместно со шламом второго настоя. Водно-спиртовые пары, получаемые при сушке, улавливаются, конденсируются и направляются на переработку для получения следующей порции экстрагента.

Деалкоголизация и концентрирование экстрактов проводится в роторном распылительном испарителе до содержания сухих веществ 50 % масс. в следующих условиях. Вакуум в испарителе  $p = (88...96)$  кПа. Расход исходного продукта определяется из диапазона удельной нагрузки РРИ по жидкой фазе (4.6):

$$V_H = F_K \cdot (5...40) \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}. \quad (4.9)$$

В качестве греющего теплоносителя используется вода, турбулизируемая воздухом. Температура воды на входе в аппарат  $t_{BH} = (84...100)$  °С. Объемный расход воды определяется из выражения

$$V_B = G_B / \rho_B \text{ м}^3/\text{с}, \quad (4.10)$$

где  $G_B$  – массовый расход воды, определяемый из уравнения (4.4), кг/с;  $\rho_B$  – плотность воды при  $t_{BH}$ .

Расход воздуха определяется как произведение удельного расхода воздуха

(выражение 4.8) на объемный расход воды:

$$V_{\text{ВОЗД}} = 0,074 \cdot V_B \text{ м}^3/\text{с}. \quad (4.11)$$

Соответствие содержания сухих веществ в концентрате заданной концентрации определяется по рефрактометру после охлаждения пробы до 20 °С.

Получаемый при деалкоголизации и концентрировании экстрактов водно-спиртовой конденсат используется для приготовления следующей порции экстрагента.

Готовый концентрат фильтруется через лавсан и охлаждается до 20 °С в трубчатом охладителе. Охлаждение проводится быстро, чтобы в экстракте не образовались нерастворимые осадки. Затем проверяется плотность и химический состав концентрированного экстракта. В случае обнаружения отклонений от требований отдельные партии концентрата купажируют так, чтобы готовый продукт по химическому составу соответствовал требованиям технических условий. Розлив, укупорку, маркировку производят в соответствии с требованиями технических условий.

Расфасованные концентрированные экстракты хранят при температуре 0...5 °С: экстракт боярышника кроваво-красного – не более 30 дней; экстракт калины обыкновенной – не более 60 дней. Экстракты, фасованные в стеклянную тару, во избежание изменения цвета хранят в таре из темного стекла, в темных помещениях.

### **4.3 Разработка рекомендаций по практическому применению концентрированных экстрактов боярышника кроваво-красного и калины обыкновенной**

Для разработки рекомендаций по практическому использованию концентрированных водно-спиртовых экстрактов боярышника кроваво-красного и калины обыкновенной в технологической лаборатории производственной базы ООО «Савой» (г. Рубцовск Алтайского края) была проведена экспериментальная работа по определению оптимальных рецептур экспериментальных напитков с добавлением концен-

трированных экстрактов боярышника кроваво-красного и калины обыкновенной.

Рецептуры напитков разрабатывались на основе безалкогольного напитка серии «Хочу. Яблоко», производимого ООО «Савой» в соответствии с требованиями государственного стандарта [18] по рецептуре РЦ 10-40610205-3671-09.

Приготовление базового напитка производилось по технологии ООО «Савой».

Приготовленный напиток разливался по 9 пробникам. В пробники под номерами 1-5 добавлялся концентрированный экстракт из плодов боярышника кроваво-красного, полученный водно-спиртовой экстракцией с последующей деалкоголизацией и концентрированием до 51,5 % масс. сухих веществ. Содержание концентрата в образцах напитков составляло: №1 – 1 % об., №2 – 2 % об., №3 – 2,5 % об., №4 – 5 % об. и №5 – 10 % об.

В пробники под номерами 6-9 добавлялся концентрированный экстракт калины обыкновенной, полученный водно-спиртовой экстракцией с последующей деалкоголизацией и концентрированием до 54 % масс. сухих веществ. Содержание концентрата в образцах напитков составляло №6 – 1 % об., №7 – 2 % об., №8 - 2,5 % об. и №9 – 5 % об.

Органолептическая оценка тестируемых образцов производилась дегустационной комиссией по 19-балльной шкале, в соответствии с правилами проведения сенсорного анализа органолептической оценки пищевых продуктов [79].

Органолептическая оценка образцов напитков представлена в таблицах 4.1 и 4.2.

Таблица 4.1

**Органолептическая оценка образцов напитков с содержанием экстракта боярышника кроваво-красного по 19-балльной шкале**

Показатель	Номер образца				
	№1	№2	№3	№4	№5
Прозрачность, цвет, внешний вид	4	5	6	7	5
Вкус и аромат	9	10	10	12	11
Общая балловая оценка	13	15	16	19	16
Уровень качества	удовлетворительно	хорошо	хорошо	отлично	хорошо

**Органолептическая оценка образцов напитков с содержанием экстракта  
калины обыкновенной по 19-балльной шкале**

Показатель	Номер образца			
	№6	№7	№8	№9
Прозрачность, цвет, внешний вид	4	5	6	7
Вкус и аромат	9	10	10	12
Общая балловая оценка	13	15	16	19
Уровень качества	удовлетворительно	хорошо	хорошо	отлично

Дегустационная комиссия, рассмотрев представленные образцы, пришла к заключению, что образцы №4 (с содержанием 5% об. экстракта боярышника) и №9 (с содержанием 5% об. экстракта калины обыкновенной) представляют наибольший интерес и рекомендуются для согласования с последующим внедрением в производство.

На основании разработанной технологической схемы и рецептур опытных напитков, с целью оценки перспектив организации производства плодово-ягодных концентрированных экстрактов на предприятии ООО «Савой», был разработан бизнес – план внедрения инновационных технологий, в котором рассчитаны затраты на производство концентрированных экстрактов, построен график точки безубыточности, произведена оценка финансовой деятельности предприятия за месяц. Путем определения чистого дисконтированного дохода сделан вывод об успешности предлагаемого проекта. Размер капитальных затрат – 2 932 943 рублей, срок окупаемости – 6 месяцев.

#### 4.4 Выводы по главе

1 На основании теоретических и экспериментальных исследований предложена методика расчета роторных распылительных испарителей, обогревае-

мых теплоносителем представляющем собой водно-воздушную смесь, для проведения процессов dealкоголизации и концентрирования жидких пищевых продуктов.

2 Разработана технологическая схема производства dealкоголизованных концентрированных водно-спиртовых плодово-ягодных экстрактов с использованием РРИ.

3 Разработаны проектные рецептуры безалкогольных напитков серии «Хочу» с добавлением концентрированных экстрактов боярышника кроваво-красного и калины обыкновенной, рекомендованные для внедрения в производство на ООО «Савой» г. Рубцовск Алтайского края.

4 На основании технологической схемы и состава рецептур разработан бизнес – план внедрения инновационных технологий с целью оценки перспектив организации производства плодово-ягодных концентрированных экстрактов на предприятии ООО «Савой».

## ВЫВОДЫ

1 Экспериментально исследованы теплофизические свойства экстрактов боярышника кроваво-красного и калины обыкновенной (теплопроводность, теплоемкость и температуропроводность) в зависимости от температуры, концентрации сухих веществ и спирта в диапазонах, удовлетворяющих практическим требованиям.

2 В результате математической обработки опытных данных на ЭВМ в среде статистического пакета "STATISTICA-6,0" получены зависимости, описывающие распределение значений теплопроводности, теплоемкости и температуропроводности экстрактов боярышника кроваво-красного и калины обыкновенной от температуры и содержания в них сухих веществ и спирта, пригодные для инженерных расчетов.

3 Исследовано влияние подачи воздуха в горячий теплоноситель на интенсивность теплообмена в роторном распылительном испарителе, построена экспериментально – статистическая модель для расчета коэффициента теплоотдачи в гребней рубашке при переработке жидких пищевых продуктов.

4 Определены рациональные параметры и режимы процессов dealкоголизации и концентрирования водно-спиртовых экстрактов боярышника кроваво-красного и калины обыкновенной.

5 Предложена методика расчета роторных распылительных испарителей, обогреваемых водно-воздушной смесью, для проведения процессов dealкоголизации и концентрирования жидких пищевых продуктов.

6 Разработана технологическая схема производства концентрированных экстрактов боярышника кроваво-красного и калины обыкновенной с использованием РРИ.

7 Разработаны проектные рецептуры безалкогольных напитков с добавлением концентрированных экстрактов боярышника и калины, а также бизнес-план организации производства экстрактов на ООО «Савой» (г. Рубцовск Алтайского края).



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Абрамович Г.Н. Газожидкостная струя (истечение газа в жидкость)/ Г.Н. Абрамович // Турбулентные двухфазные течения (тезисы докладов IV Всесоюзного научного совещания по теоретическим и прикладным аспектам турбулентных течений). Ч. I / Под ред. М.К. Латааса. – Таллин, 1982. – С. 3-15.
- 2 Агапов Б.Т. Лабораторный практикум по физике. Учеб. пособие/ Б.Т. Агапов, Г.В. Масютин, П.И. Островерхов. – М.: Высш. шк., 1982. – 335 с.
- 3 Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий/ Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 283 с.
- 4 Александров И.А. Ректификационные и абсорбционные аппараты. Методы расчета и основы конструирования. – 3-е изд., перераб. – М.: Химия, 1978.– 280 с.
- 5 Андерсон Д. Вычислительная гидромеханика и теплообмен. - В 2 т. Т.1: Пер. с англ./ Д. Андерсон, Дж. Тажехилл, Р. Плетчер. – М.: Мир, 1990. – 384с.
- 6 Бабенко Ю.И. Тепломассообмен: Метод расчета тепловых и диффузионных потоков. – Л.: Химия, 1986. – 144 с.
- 7 Боровиков В.П. STATISTICA: Статистический анализ и обработка данных в среде Windows. Изд. 2-е, стереотипное / В.П. Боровиков, И.П. Боровиков. – М.: Филинь, 1998. – 608 с.
- 8 Бурачевский И.И. Современные способы получения фабрикатов ликероводочного производства / И.И. Бурачевский, К.И. Скрипник – М.: Лег. и пищ. пром-сть, 1981. – 135с.
- 9 Варгафтик Н.Б. Справочник по теплопроводности жидкости и газов / Н.Б. Варгафтик, Л.П. Филиппов, А.А. Тарзиманов, Е.Е. Тоцкий. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.
- 10 ВасиLINEЦ И.М. Роторно-пленочные аппараты в пищевой промышленности/ И.М. ВасиLINEЦ, А.Г. Сабуров. – М.: Агропромиздат, 1989. – 136 с.
- 11 Великая Е.И. Лабораторный практикум по курсу общей технологии бродильных производств (общие методы контроля)/ Е.И. Великая, В.Ф. Суходол.– М.: Лег. и пищ. пром-сть, 1983. – 312 с.
- 12 Воронцов Е.Г. Теплообмен в жидкостных пленках/ Е.Г. Воронцов, Ю.М. Тананайко. - Киев: Техніка, 1972. – 196 с.
- 13 Воскресенский П.И. Техника лабораторных работ. – Л.: Химия, 1970. – 720 с.
- 14 Выпарные трубчатые аппараты общего назначения для химических производств: Каталог / Под ред. В.И. Червы. – М.: ЦИНТИХИМ НЕФТЕМАШ, 1985. – 16 с.

- 15 Галицейский Б.М. Тепловые и гидромеханические процессы в колеблющихся потоках/ Б.М. Галицейский, Ю.А. Рыжов, Е.В. Якуш. – М.: Машиностроение, 1977. – 256 с.
- 16 Гинзбург А.С. Теплофизические характеристики пищевых продуктов: Справочник / А.С. Гинзбург, М.А. Громов, Г.И. Красовская. – М.: Агропромиздат, 1990. – 87 с.
- 17 Гончарова Т.А. Энциклопедия лекарственных растений (лечение травами). – В 2 т. Т.1. – М.: Изд. дом МСП, 1997. – 560 с.
- 18 ГОСТ 28188-89. Напитки безалкогольные. Общие технические условия.
- 19 ГОСТ 3852-93. Плоды боярышника. Технические условия.
- 20 Гриценко В.В. Обоснование использования концентрированных экстрактов из плодов боярышника кроваво-красного и калины обыкновенной в качестве витаминно-вкусовых добавок продуктов питания [Текст] / В.В. Гриценко// Труды Рубцовского индустриального института: Выпуск 17: Технические науки // Рубцовский индустриальный институт. – Рубцовск, 2007. – С. 19-25.
- 21 Гуськов К.П. Реология пищевых масс / К.П. Гуськов, Ю.А. Мачихин, С.А. Мачихин, Л.Н. Лукин. – М.: Пищ. пром-сть, 1970. – 208 с.
- 22 Даниленко М.И. Разработка и исследование роторного газопромывателя с целью интенсификации процесса пылеочистки: Автореф. дис...канд. техн. наук. – Кемерово, 1996. – 19 с.
- 23 Домарецкий В.А. Производство концентратов, экстрактов и безалкогольных напитков: Справочник / В.А. Домарецкий. – К.: Урожай, 1990. – 245 с.
- 24 Домашняя медицинская энциклопедия: Аборт – Ящур / Гл. ред. В.И. Покровский. – М.: Медицина, 1993. – 496 с.
- 25 Дорфман А.Ш. Теплообмен при обтекании неизотермических тел. – М.: Машиностроение, 1982. – 192 с.
- 26 Дулицкая Р.А. Практикум по физической и коллоидной химии: Учеб. пособие для нехимич. вузов. – Изд. 2-е, испр. и доп./ Р.А. Дулицкая, Р.И. Фельдман. – М.: Высш. шк., 1978. – 232 с.
- 27 Дьякова Н.М. Лекарственные растения – детям. – Барнаул: Палитра, 1991. – 48 с.
- 28 Задорожный А.М. Справочник по лекарственным растениям / А.М. Задорожный, А.Г. Кошкин, С.Я. Соколов и др. – М.: Лесн. пром-сть, 1988. – 415 с.
- 29 Зажигаев Л.С. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента/ Л.С. Зажигаев, А.А. Кишьян, Ю.И. Романиков. – М.: Атомиздат, 1978. – 232 с.
- 30 Ибрагимов М.Х. Структура турбулентного потока и механизм теплообмена в каналах / М.Х. Ибрагимов, В.И. Субботин, В.П. Бобков и др. – М.: Атомиздат, 1978. – 296 с.

- 31 Иванов П.П. Разработка технологии и аппаратурного оформления производства концентрированных плодово-ягодных экстрактов для молочной промышленности: Дис...канд. техн. наук. – Кемерово, 2002. – 135 с.
- 32 Иванова Т.Н. Лесная кладовая / Т.Н. Иванова, Л.Ф. Путинцева. – Тула: Приок. кн. изд-во, 1993. – 351 с.
- 33 Исаченко В.П. Теплопередача/ В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сухомел. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.
- 34 Кавецкий Г.Д. Процессы и аппараты пищевой технологии / Г.Д. Кавецкий, Б.В. Васильев. – М.: Колос, 1999. – 551 с.
- 35 Калинин Э.К. Интенсификация теплообмена в каналах / Э.К. Калинин, Г.А. Дрейцер, С.А. Ярхо. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1990. – 208 с.
- 36 Кириллов П.Л. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы)/ П.Л. Кириллов, Ю.С. Юрьев, В.П. Бобков/ Под общ. ред. П.Л. Кириллова. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 296 с.
- 37 Киселева А.В. Биологически активные вещества лекарственных растений Южной Сибири / А.В. Киселева, Т.А. Волхонская, В.Е. Киселев. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1991. – 136 с.
- 38 Коган В.Б. Теоретические основы тепловых процессов химической технологии. – Л.: Химия, 1977. – 320 с.
- 39 Коган В.Б. Азеотропная и экстрактивная ректификация. – Изд. 2-е, доп. и пер. - Л.: Химия, 1971. – 432 с.
- 40 Коган В.Б. Оборудование для разделения смесей под вакуумом/ В.Б. Коган, М.А. Харисов. – Л.: Машиностроение, 1976. – 376 с.
- 41 Кошечев А.К. Дикорастущие съедобные растения в нашем питании. – М.: Пищ. пром-сть, 1980. – 256 с.
- 42 Крылов Г.В. Травы жизни и их искатели. – Томск: Красное знамя, 1993. – 391 с.
- 43 Куликов В.В. Лекарственные растения Алтайского края. – Барнаул: Алт. кн. изд-во, 1975. – 208 с.
- 44 Кутателадзе С.С. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое. - 2-е изд., перераб/ С.С. Кутателадзе, А.И. Леонтьев. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 320 с.
- 45 Кутателадзе С.С. Экспериментальное исследование аналогии процессов кипения и барботажа / С.С. Кутателадзе, И.Г. Маленков // ПМТФ. – 1966. – №2. – С. 140-143.
- 46 Лекарственные растения и их применение в медицине / Под ред. И.А. Винникова. – Изд-во Саратов. ун-та, 1962. – 203 с.

- 47 Лекарственные растения. Справочное пособие / Н.И. Гранкевич, И.А. Баландина, В.А. Ермакова и др.; Под ред. Н.И. Гранкевич. – М.: Высш. шк., 1991.– 398 с.
- 48 Лесная аптека / Под ред. Е.Д. Солодухина.; Сост. Л.И. Бариковой, В.А. Алексеева. – Харьков, САДПР, 1991. – 192 с.
- 49 Лиссер С.А. Гидродинамика и теплообмен в роторном пленочно – струйном испарителе: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Л., 1991.- 16 с.
- 50 Лыков А.В. Тепломассообмен: Справочник. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1978. – 488 с.
- 51 Люкшин П.А. Термодинамика и теплопередача: Конспект лекций для студентов всех форм обучения / Рубцов. индустр. ин-т. – Рубцовск, 2002. – 190 с.
- 52 Марценюк А.С. Пленочные тепло- и массообменные аппараты в пищевой промышленности/ А.С. Марценюк, В.Н. Стабников. – М.: Легк. и пищ. пром-сть, 1981. – 160 с.
- 53 Марх А.Т. Теплохимический контроль консервного производства/ А.Т. Марх и др. – М.: Агропромиздат, 1989. – 304 с.
- 54 Машины и аппараты пищевых производств: Учеб. для вузов.: В 2 кн. Кн. 2 / С.Т. Антипов, И.Т. Кретов, А.Н. Остриков и др.; Под ред. В.А. Панфилова. – М.: Высш. шк., 2001. – 680 с.
- 55 Методы и средства измерений физических величин / Материалы шестой Всерос. науч.-техн. конф. 25–26 сент. 2002 г. – Н. Новгород: Межрегион. Верхневолжск. отд-е Академии технолог. наук Рос. Федерации (МВВО АТНРФ), 2002. – 29 с.
- 56 Методы определения теплопроводности и температуропроводности/ Под ред. А.В. Лыкова. – М.: Энергия, 1973. – 336 с., ил.
- 57 Методы расчета турбулентных течений: Пер. с англ. / Под ред. В. Кольмана. – М.: Мир, 1984. – 464 с.
- 58 Мирценюк А.С. Пленочные тепло- и массообменные аппараты в пищевой промышленности/ А.С. Мирценюк, В.Н. Стабников. - М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. – 160 с.
- 59 Моисеева Г.Ф. Наши зеленые целители / Г.Ф. Моисеева, С.Г. Макаренко. - СПб.: Лениздат, 1992. – 158 с.
- 60 Мустафина А.С. Разработка технологии плодово-ягодных экстрактов с целью использования в производстве молочных продуктов: Дис...канд. техн. наук. – Кемерово, 1999. – 165 с.
- 61 Новиков П.А. Течения и тепломассообмен в щелевых системах/ П.А. Новиков, Л.Я. Любин, В.И. Новикова. – Мн.: Навука і тэхніка, 1991. – 357 с.

- 62 Олевский В.М. Роторно-пленочные тепло- и массообменные аппараты/ В.М. Олевский, В.Р. Ручинский. – М.: Химия, 1977. – 208 с.
- 63 Павильонов А.А. Новые плодовые и ягодные культуры / А.А. Павильонов, М.И. Рожков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Россельхозиздат, 1986. – 88 с.
- 64 Павлов К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии/ К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков: Учебное пособие для вузов / Под ред. чл.-корр. АН СССР П.Г. Романкова. – 9-е изд., перераб. и доп. – Л.: Химия, 1981. – 560 с.
- 65 Пастушенков Л.В. Лекарственные растения: Использование в народной медицине и быту / Л.В. Пастушенков, А.А. Пастушенков, В.Л. Пастушенков. – Л.: Лениздат, 1990. – 384 с.
- 66 Пат. 2248237. РФ. Заборное устройство распылителя / А.Ф. Сорокопуд, Д.В. Тарабрин. – № 2003124742/15; Заявлено 2003.08.07; Оpubл. 2005.03 20, Б.И. 2007, № 18.
- 67 Петлюк Ф.Б. Многокомпонентная ректификация. Теория и расчет/ Ф.Б. Петлюк, Л.А. Серафимов. – М.: Химия, 1983. – 304 с.
- 68 Петрова В.П. Биохимия дикорастущих плодово-ягодных растений. – К.: Вища шк. Головное изд-во, 1986. – 287 с.
- 69 Петрова В.П. Дикорастущие плоды и ягоды. – М.: Лесн. пром-сть, 1987. – 248 с.
- 70 Петухов Б.С. Обобщенные зависимости для теплоотдачи в трубах кольцевого сечения / Б.С. Петухов, Л.И. Ройзен // Теплофизика высоких температур. – 1974. – Т. 12. – № 3. – С. 565 – 569.
- 71 Пищевая химия / А.П. Нечаев, С.Е. Траубенберг, А.А. Кочеткова и др.; Под ред. А.П. Нечаева. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – СПб.: ГИОРД, 2003. – 640 с.
- 72 Пищевые растения в тибетской медицине / Т.А. Асеева, Ц.А. Найдакова.– 3 – е изд., испр. и доп. – Новосибирск: Наука. Сиб отд-ние, 1991. – 129 с.
- 73 Попов А.П. Лесные целебные растения. – 2-е изд. – М.: Экология, 1992. – 160 с.
- 74 Попов Д.М. О возможности снижения брызгоуноса в роторном распылительном аппарате // Технология и техника пищевых производств: Сб. науч. работ КемТИПП/ Д.М. Попов, А.Ф. Сорокопуд. – Кемерово, 2003. – С. 172-174.
- 75 Преображенский В.П. Теплотехнические приборы и измерения. –М.: Энергия, 1978. – 705 с.
- 76 Производственный технологический регламент на производство водок и ликероводочных изделий. ТР 10-04-03-09-88. Разраб. ВНИИ ПБТ. – М.: АгроНИИТЭИПП, 1990. – 333 с.

- 77 Прохорчик И.П. Интенсификация процесса инъекции воздуха свободными струями жидкости в кожухотрубных струйно-инжекционных аппаратах: Автореф. дис...канд. техн. наук. – Л., 1989. – 16 с.
- 78 Реометрия пищевого сырья и продуктов: Справочник / Под ред. Ю.А. Мачихина. – М.: Агропромиздат. – 1990. – 271 с.
- 79 Родина Т. Г. Сенсорный анализ продовольственных товаров. – М.: Издательский центр РЭА им. Г.В.Плеханова, 2004. – 130 с.
- 80 Роторные испарители (колонные роторные аппараты с шарнирными лопатками): Каталог / Сост. А.Н. Марченко, А.В. Витер, Т.Г. Яшина и др. – М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1985. – 16 с.
- 81 РСТ РСФСР 22-75. Калина лесная свежая.
- 82 Рыбальченко Т.А. Разработка процесса разделения водной смеси спиртов, хлорированных углеводов и кетонов: Дис... канд. техн. наук. – Барнаул: Изд-во АПИ, 1985. – 232 с.
- 83 Сборник технологических инструкций по производству консервов. Том 11. Консервы фруктовые, часть 2: Жуковский – Петит, 1992. – 360 с.
- 84 Свиридонов Г.М. Лесной огород. – Томск: Томское кн. изд-во, 1987. – 208 с.
- 85 Склярковский Л.Я. Лекарственные растения в быту / Л.Я. Склярковский, И.А. Губанов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Россельхозиздат, 1986. – 272 с.
- 86 Сорокопуд А.Ф. Разработка конструкции и методики расчета роторной распылительной колонны с уменьшенным брызгоуносом: Дис...канд. техн. наук. – М.: Изд-во МИХМ, 1987. – 233 с.
- 87 Сорокопуд А.Ф. Разработка и совершенствование роторных распылительных аппаратов с целью интенсификации процессов в гетерогенных газожидкостных системах: Дис...докт. техн. наук. – Кемерово, 1998. – 529 с.
- 88 Сорокопуд А.Ф. Теплопроводность водно-спиртовых экстрактов из черной смородины // Пищевые продукты и экология: Тез. науч. работ КемТИПП/ А.Ф. Сорокопуд, А.С. Муштафина, Н.Г. Третьякова. – Кемерово, 1998. – С. 126.
- 89 Сорокопуд А.Ф. Исследование температуры кипения водно-спиртовых экстрактов красной смородины // Технологии и процессы пищевых производств: Тез. науч. работ/ А.Ф. Сорокопуд, Н.Г. Третьякова, П.П. Иванов. – Кемерово, 1999. – С. 129.
- 90 Сорокопуд А.Ф. Использование сухих ягод красной рябины в производстве экстрактов // Пищевые продукты и экология: Тез. науч. работ/ А.Ф. Сорокопуд, Н.Г. Третьякова, В.А. Помозова. – Кемерово, 1998. – С. 131.

- 91 Сорокопуд А.Ф. Применение системного анализа при исследовании роторных распылительных аппаратов // Совершенствование существующего и разработка нового оборудования для пищевой промышленности. Вып. 1: Сб. науч. тр. КемТИПП. – Кемерово, 2006. – С. 24-29.
- 92 Сорокопуд А.Ф. Исследование влияния высоты заборного устройства распылителя на его основные характеристики // Совершенствование существующего и разработка нового оборудования для пищевой промышленности. Вып. 1: Сб. науч. тр. КемТИПП/ А.Ф. Сорокопуд, П.В. Алексеев, А.А. Манеев.– Кемерово, 2006. – С. 17-20.
- 93 Сорокопуд А.Ф. Теплообмен в роторных испарителях и пути его интенсификации / А.Ф. Сорокопуд, В.В. Гриценко.- М., 2008.-13 с. – Деп. в ЦИ и ТЭИагропром 18.02.08, № 1 ВС.
- 94 Сорокопуд А.Ф. Физикохимические свойства экстрактов плодов боярышника кроваво-красного и калины обыкновенной [Текст] / А.Ф. Сорокопуд, Н.В. Дубинина // Пиво и напитки. – 2008. – № 3. – С. 46-47.
- 95 Справочник по теплообменникам. В 2 т. Т.1: Пер. с англ./ Под ред. Б.С. Петухова, В.К. Шикова. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 560 с.
- 96 Справочник по электроизмерительным приборам / К.К. Илюнин, Д.И. Леонтьев, Л.И. Набебина и др.; Под ред. К.К. Илюнина. – 3-е изд. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1983. – 784 с.
- 97 Сукомел А.С. Теплообмен и гидравлическое сопротивление при движении газозвеси в трубах. – М.: Энергия, 1977. – 192 с.
- 98 Тананайко Ю.М. и др. Тепло- и массоперенос // Наука и техника. – Т. 4, 1968. – С. 385-389; Т. 10, 1968. – С. 179-181.
- 99 Тарабрин Д.В. Исследование эффективности работы заборного устройства распылителя // Совершенствование существующего и разработка нового оборудования для пищевой промышленности. Вып. 1: Сб. науч. тр. КемТИПП/ Д.В. Тарабрин, А.Ф. Сорокопуд. – Кемерово, 2006. – С. 21-23.
- 100 Таубман Е.И. Выпаривание (Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии). – М.: Химия, 1982. – 328 с.
- 101 Теория теплообмена. Вып. 83: Терминология. - М.: Наука, 1971. – 80с.
- 102 Тепло и массообмен. Теплотехнический эксперимент: Справочник/ Е.В. Аметищев, В.А. Григорьев, Б.Т. Емцев и др.; Под общ. ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина. – М.: Энергоиздат, 1982. – 512 с.

- 103 Теплообмен и гидродинамика в каналах сложной формы / Ю.И. Данилов, Б.В. Дзюбенко, Г.А. Дрейцкер и др.; Под ред. чл.-корр. АН СССР В.М. Иевлива. – М.: Машиностроение, 1986. – 200 с.
- 104 Теплообмен при кипении в полях массовых сил различной интенсивности/ Б.И. Веркин, Ю.А. Кириченко, К.В. Русанов. – Киев: Наук. думка, 1988.– 256 с.
- 105 Третьякова Н.Г. Плотность водно-спиртовых экстрактов красной смородины // Технологии и процессы пищевых производств: Тез. науч. работ. КемТИПП. – Кемерово, 1999. – С.129.
- 106 Третьякова Н.Г. Совершенствование технологии производства пищевых продуктов с использованием роторного распылительного испарителя: Дис... канд. техн. наук. – Кемерово, 2002. – 158 с.
- 107 Турбулентность/ Пер. с англ. П. Бредшоу, Т. Себеси, Г.-Г. Фернгольц и др.; Под ред. П. Бредшоу. – М.: Машиностроение, 1980. – 343 с.
- 108 Турбулентные течения и теплопередача/ Под ред. Линь Ц.Ц.; Пер. с англ. Шиловского В.П. - М.: Изд-во иностр. лит., 1963. – 563 с.
- 109 Турова А.Д. Лекарственные растения СССР и их применение / А.Д. Турова, Э.Н. Сапожникова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Медицина, 1983. – 288 с.
- 110 Ульянов В.М. Поверхность контакта фаз и массообмен в тарельчатых ректификационных аппаратах. – Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 1982. – 130 с.
- 111 Федоткин И.М. Оптимизация выпарного оборудования / И.М. Федоткин, В.А. Кравченко, В.А. Саввич. – К.: Техніка, 1985. – 150 с., ил.
- 112 Федоров Е.А. Гидродинамика, тепло- и массообмен в роторных распылительных аппаратах: Дис...канд. техн. наук. – Кемерово, 1997. – 181 с.
- 113 Филимонова Е.Ю. Плоды и ягоды Сибири для переработки // Пищ. пром-сть. – 1989. – №11. – С.43.
- 114 Хантли Г. Анализ размерностей. – М., 1970. – 176с.
- 115 Химический состав пищевых продуктов. Кн. 1: Справ. таблицы содержания основных пищевых веществ и энергетической ценности пищевых продуктов / Под ред. И.М. Скурихина, М.Н. Волгарева. – 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Агропромиздат, 1987. – 224 с.
- 116 Цой П.В. Методы расчета задач тепломассопереноса. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 416 с.
- 117 Черпаков П.В. Теория регулярного теплообмена.– М.: Энергия, 1975. – 224 с.
- 118 Чубик И.А. Справочник по теплофизическим характеристикам пищевых продуктов и полуфабрикатов/ И.А. Чубик, А.М. Маслов. – М.: Пищ. пром-сть, 1970. – 184 с.



- 119 Шапиро Д.К. Дикорастущие плоды и ягоды / Д.К. Шапиро, Н.И. Манциводо, В.А. Михайловская. – 3-е изд., перераб. и доп. – Мн.: Ураджай, 1988. – 128 с.
- 120 Шевцова Т.Г. О влиянии сепарационного эффекта на брызгоунос в роторном пылителем аппарате // Технология и техника пищевых производств: Сб. науч. работ КемТИПП/ Т.Г. Шевцова, А.Ф. Сорокопуд. – Кемерово, 2003. – С. 175-177.
- 121 Acrivos A. Heat transfer at high Peclet number from a small sphere freely rotating in a simple shear field.— J. Fluid Mech., 1971, v. 46, No. 2, p. 232—240.
- 122 Acrivos A. A note on the rate of heat or mass transfer from a small particle freely suspended in linear shear field.— J. Fluid Mech., 1980, v. 98, No. 2, p. 299—304.
- 123 Batchelor G. K. Mass transfer from small particles suspended in turbulent fluid,— J. Fluid Mech., 1980, v. 98, No. 3, p. 609-623.
- 124 Chida K., Katto I. Study on conjugate heat transfer by vectorial dimensional analysis. - Int. J. Heat Mass Transfer. – 1976, vol. 23, - №1.— pp. 453-460.
- 125 Giedt W.H., Trans. ASME, v. 71, №4, 1949.
- 126 Gnielinski. V. New Equation for Heat and Mass Transfer in Turbulent Pipe and Channel Flow. Int. Chem. Eng., vol. 16, pp. 359-368, 1976.
- 127 Gross G., Chemie-Ingenieur-Technik, №3, 1959.
- 128 Kuwabara S. The forces experienced by randomly distributed parallel cylinders of spheres in a viscous flow at small Reynolds numbers.— J. Phys. Soc. Japan, 1959, v. 14, No. 4, p. 527—532.
- 129 Lyon R.N., Chem. Eng. Progress, v. 47, №2, 1951.
- 130 Nunner W., VDI-Forschungsheft, №455, 1956, S. 39.
- 131 Seban R.A., Shimazaki T.T., Trans. ASME, v. 73, №6, 1951.
- 132 [http// www.ros-beverage.ru/](http://www.ros-beverage.ru/) - Оборудование для производства и розлива напитков/Статьи/Технология плодово-ягодных концентратов для безалкогольных напитков.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### ПРИЛОЖЕНИЕ П 1

#### Химический состав и энергетическая ценность плодово-ягодного сырья

Основные компоненты	Содержание, %	
	Боярышник кроваво-красный	Калина обыкновенная
Массовая доля влаги	87,20	88,00
Основные сахара	1,5 ÷ 14,5 фруктоза, глюкоза, мало сахарозы	6,5 ÷ 7,8 глюкоза, фруктоза
Клетчатка	3,1	2,8
Пектиновые вещества	0,79 ÷ 3,68	0,38 ÷ 0,92
Органические кислоты	0,30-1,92 Яблочная, лимонная, янтарная, винная, кратеговая, олеаноловая, урсоловая, хинная, кофейная, хлорогеновая	1,67-3,10 Яблочная, валериановая, изовалериановая, хинная, кофейная
Зола	1,1	0,6
Дубильные и красящие вещества (мг%)	230 ÷ 1980	440 ÷ 1660
Энергетическая ценность, (ккал)	61 ÷ 83	35 ÷ 39

## ПРИЛОЖЕНИЕ П 2

### Содержание витаминов и фенольных соединений в плодово-ягодном сырье

Витамины и фенольные соединения	Содержание витаминов и фенольных соединений, (мг на 100 г массы свежих плодов)	
	Боярышник кроваво-красный	Калина обыкновенная
β-каротин	0,25 ÷ 1,8	1,4 ÷ 2,5
Витамин С	8,0 ÷ 90,0	5,0 ÷ 30,0
Фолиевая кислота	0,0004	0,00003
Витамин К <sub>1</sub>	0,1 ÷ 0,7	–
Сумма антоцианов и лейкоантоцианов	741,0 ÷ 2328,0	692,7 ÷ 1257,4
Катехины	110,0 ÷ 1264,0	52,3 ÷ 363,0
Флавонолы	83,0 ÷ 295,0	56,2 ÷ 206,2

## ПРИЛОЖЕНИЕ П 3

### Содержание минеральных веществ в плодово-ягодном сырье

Минеральные вещества	Содержание минеральных веществ	
	Боярышник кроваво-красный	Калина обыкновенная
<b>Макроэлементы</b> (мг/г)	17,14	15,94
К	13,1	12,0
Ca	3,0	2,7
Mg	1,0	1,2
Fe	0,04	0,04
<b>Микроэлементы</b> (мкг/г)	14,88	14,71
Mn	0,04	0,03
Cu	0,29	0,4
Zn	0,07	0,47
Co	0,37	-
Cr	0,01	0,12
Al	0,03	0,01
Se	11,8	9,75
Ni	0,1	0,23
Sr	0,06	0,33
Pb	0,05	0,08
I	0,06	0,09
B	2,0	3,2

**ПРИЛОЖЕНИЕ П 4**

**Результаты экспериментальных исследований теплофизических свойств  
экстрактов боярышника кроваво-красного**

<b>№ п/п</b>	<b>С<sub>св</sub>, %масс.</b>	<b>С<sub>сп</sub>, %об.</b>	<b>t, °С</b>	<b>λ, Вт/(м·К)</b>	<b>с, кДж/(кг·К)</b>	<b>а·10<sup>6</sup>, м<sup>2</sup>/с</b>
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
1	5	0	20	0,4173844	3,901062	0,104594
2	20	0	20	0,4007644	3,608817	0,101712
3	35	0	20	0,3841444	3,316572	0,099788
4	50	0	20	0,3675244	3,024327	0,098830
5	65	0	20	0,3509044	2,732082	0,098912
6	5	0	27	0,4355424	3,993966	0,107003
7	20	0	27	0,4189224	3,701721	0,104014
8	35	0	27	0,4023024	3,409476	0,101991
9	50	0	27	0,3856824	3,117231	0,100934
10	65	0	27	0,3690624	2,824986	0,100905
11	5	0	34	0,4537004	4,08687	0,109338
12	20	0	34	0,4370804	3,794625	0,106236
13	35	0	34	0,4204604	3,50238	0,104109
14	50	0	34	0,4038404	3,210135	0,102946
15	65	0	34	0,3872204	2,91789	0,102800
16	5	0	41	0,4718584	4,179774	0,111604
17	20	0	41	0,4552384	3,887529	0,108386
18	35	0	41	0,4386184	3,595284	0,106148
19	50	0	41	0,4219984	3,303039	0,104875
20	65	0	41	0,4053784	3,010794	0,104608
21	5	0	48	0,4900164	4,272678	0,113807
22	20	0	48	0,4733964	3,980433	0,110467
23	35	0	48	0,4567764	3,688188	0,108116
24	50	0	48	0,4401564	3,395943	0,106729
25	65	0	48	0,4235364	3,103698	0,106336
26	5	15	20	0,3863044	3,907227	0,101579
27	20	15	20	0,3696844	3,614982	0,098122
28	35	15	20	0,3530644	3,322737	0,095631
29	50	15	20	0,3364444	3,030492	0,094084
30	65	15	20	0,3198244	2,738247	0,093521
31	5	15	27	0,4044624	4,000131	0,104291
32	20	15	27	0,3878424	3,707886	0,100729
33	35	15	27	0,3712224	3,415641	0,098150
34	50	15	27	0,3546024	3,123396	0,096523
35	65	15	27	0,3379824	2,831151	0,095879
36	5	15	34	0,4226204	4,093035	0,106918
37	20	15	34	0,4060004	3,80079	0,103246
38	35	15	34	0,3893804	3,508545	0,100570
39	50	15	34	0,3727604	3,2163	0,098854
40	65	15	34	0,3561404	2,924055	0,098120
41	5	15	41	0,4407784	4,185939	0,109468
42	20	15	41	0,4241584	3,893694	0,105678
43	35	15	41	0,4075384	3,601449	0,102899
44	50	15	41	0,3909184	3,309204	0,101087
45	65	15	41	0,3742984	3,016959	0,100254
46	5	15	48	0,4589364	4,278843	0,111945
47	20	15	48	0,4423164	3,986598	0,108032
48	35	15	48	0,4256964	3,694353	0,105144
49	50	15	48	0,4090764	3,402108	0,103229
50	65	15	48	0,3924564	3,109863	0,102292
51	5	30	20	0,3552244	3,913392	0,098267

**Продолжение приложения П 4**

<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
52	20	30	20	0,3386044	3,621147	0,094203
53	35	30	20	0,3219844	3,328902	0,091119
54	50	30	20	0,3053644	3,036657	0,088959
55	65	30	20	0,2887444	2,744412	0,087728
56	5	30	27	0,3733824	4,006296	0,101312
57	20	30	27	0,3567624	3,714051	0,097144
58	35	30	27	0,3401424	3,421806	0,093981
59	50	30	27	0,3235224	3,129561	0,091759
60	65	30	27	0,3069024	2,837316	0,090478
61	5	30	34	0,3915404	4,0992	0,104262
62	20	30	34	0,3749204	3,806955	0,099981
63	35	30	34	0,3583004	3,51471	0,096729
64	50	30	34	0,3416804	3,222465	0,094434
65	65	30	34	0,3250604	2,93022	0,093089
66	5	30	41	0,4096984	4,192104	0,107124
67	20	30	41	0,3930784	3,899859	0,102723
68	35	30	41	0,3764584	3,607614	0,099372
69	50	30	41	0,3598384	3,315369	0,096994
70	65	30	41	0,3432184	3,023124	0,095573
71	5	30	48	0,4278564	4,285008	0,109904
72	20	30	48	0,4112364	3,992763	0,105376
73	35	30	48	0,3946164	3,700518	0,101919
74	50	30	48	0,3779964	3,408273	0,099449
75	65	30	48	0,3613764	3,116028	0,097942
76	5	45	20	0,3241444	3,919557	0,094609
77	20	45	20	0,3075244	3,627312	0,089904
78	35	45	20	0,2909044	3,335067	0,086200
79	5	45	27	0,3423024	4,012461	0,098022
80	20	45	27	0,3256824	3,720216	0,093210
81	35	45	27	0,3090624	3,427971	0,089434
82	5	45	34	0,3604604	4,105365	0,101328
83	20	45	34	0,3438404	3,81312	0,096400
84	35	45	34	0,3272204	3,520875	0,092539
85	5	45	41	0,3786184	4,198269	0,104536
86	20	45	41	0,3619984	3,906024	0,099481
87	35	45	41	0,3453784	3,613779	0,095525
88	5	45	48	0,3967764	4,291173	0,107652
89	20	45	48	0,3801564	3,998928	0,102462
90	35	45	48	0,3635364	3,706683	0,098400
91	5	60	20	0,2930644	3,925722	0,090541
92	20	60	20	0,2764444	3,633477	0,085160
93	35	60	20	0,2598244	3,341232	0,080809
94	5	60	27	0,3112224	4,018626	0,094363
95	20	60	27	0,2946024	3,726381	0,088869
96	35	60	27	0,2779824	3,434136	0,084452
97	5	60	34	0,3293804	4,11153	0,098066
98	20	60	34	0,3127604	3,819285	0,092447
99	35	60	34	0,2961404	3,52704	0,087947
100	5	60	41	0,3475384	4,204434	0,101659
101	20	60	41	0,3309184	3,912189	0,095903
102	35	60	41	0,3142984	3,619944	0,091307
103	5	60	48	0,3656964	4,297338	0,105150
104	20	60	48	0,3490764	4,005093	0,099246
105	35	60	48	0,3324564	3,712848	0,094544

**ПРИЛОЖЕНИЕ П 5**

**Результаты экспериментальных исследований теплофизических свойств  
экстрактов калины обыкновенной**

<b>№ п/п</b>	<b>Ссв, %масс.</b>	<b>Ссп, %об.</b>	<b>t, °C</b>	<b>λ, Вт/(м·К)</b>	<b>c, кДж/(кг·К)</b>	<b>a·10<sup>6</sup>, м<sup>2</sup>/с</b>
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
1	5	0	20	0,4285	3,930349	0,107940
2	20	0	20	0,396745	3,607309	0,101432
3	35	0	20	0,36499	3,284269	0,095921
4	50	0	20	0,333235	2,961229	0,091278
5	65	0	20	0,30148	2,638189	0,087424
6	5	0	27	0,438146	3,999201	0,108815
7	20	0	27	0,406391	3,676161	0,102254
8	35	0	27	0,374636	3,353121	0,096702
9	50	0	27	0,342881	3,030081	0,092025
10	65	0	27	0,311126	2,707041	0,088143
11	5	0	34	0,447792	4,068053	0,109678
12	20	0	34	0,416037	3,745013	0,103063
13	35	0	34	0,384282	3,421973	0,097466
14	50	0	34	0,352527	3,098933	0,092754
15	65	0	34	0,320772	2,775893	0,088840
16	5	0	41	0,457438	4,136905	0,110529
17	20	0	41	0,425683	3,813865	0,103857
18	35	0	41	0,393928	3,490825	0,098216
19	50	0	41	0,362173	3,167785	0,093465
20	65	0	41	0,330418	2,844745	0,089517
21	5	0	48	0,467084	4,205757	0,111369
22	20	0	48	0,435329	3,882717	0,104640
23	35	0	48	0,403574	3,559677	0,098951
24	50	0	48	0,371819	3,236637	0,094160
25	65	0	48	0,340064	2,913597	0,090176
26	5	15	20	0,39604	3,921724	0,104780
27	20	15	20	0,364285	3,598684	0,097515
28	35	15	20	0,33253	3,275644	0,091263
29	50	15	20	0,300775	2,952604	0,085847
30	65	15	20	0,26902	2,629564	0,081138
31	5	15	27	0,405686	3,990576	0,105832
32	20	15	27	0,373931	3,667536	0,098522
33	35	15	27	0,342176	3,344496	0,092243
34	50	15	27	0,310421	3,021456	0,086816
35	65	15	27	0,278666	2,698416	0,082111
36	5	15	34	0,415332	4,059428	0,106868
37	20	15	34	0,383577	3,736388	0,099510
38	35	15	34	0,351822	3,413348	0,093200
39	50	15	34	0,320067	3,090308	0,087757
40	65	15	34	0,288312	2,767268	0,083052
41	5	15	41	0,424978	4,12828	0,107887
42	20	15	41	0,393223	3,80524	0,100479
43	35	15	41	0,361468	3,4822	0,094135
44	50	15	41	0,329713	3,15916	0,088672
45	65	15	41	0,297958	2,83612	0,083961
46	5	15	48	0,434624	4,197132	0,108892
47	20	15	48	0,402869	3,874092	0,101430
48	35	15	48	0,371114	3,551052	0,095049
49	50	15	48	0,339359	3,228012	0,089564
50	65	15	48	0,307604	2,904972	0,084842
51	5	30	20	0,36358	3,913099	0,101263
52	20	30	20	0,331825	3,590059	0,093191

**Продолжение приложения П 5**

<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
53	35	30	20	0,30007	3,267019	0,086154
54	50	30	20	0,268315	2,943979	0,079921
55	65	30	20	0,23656	2,620939	0,074308
56	5	30	27	0,373226	3,981951	0,102511
57	20	30	27	0,341471	3,658911	0,094401
58	35	30	27	0,309716	3,335871	0,087351
59	50	30	27	0,277961	3,012831	0,081131
60	65	30	27	0,246206	2,689791	0,075557
61	5	30	34	0,382872	4,050803	0,103736
62	20	30	34	0,351117	3,727763	0,095584
63	35	30	34	0,319362	3,404723	0,088517
64	50	30	34	0,287607	3,081683	0,082303
65	65	30	34	0,255852	2,758643	0,076761
66	5	30	41	0,392518	4,119655	0,104942
67	20	30	41	0,360763	3,796615	0,096744
68	35	30	41	0,329008	3,473575	0,089654
69	50	30	41	0,297253	3,150535	0,083440
70	65	30	41	0,265498	2,827495	0,077922
71	5	30	48	0,402164	4,188507	0,106128
72	20	30	48	0,370409	3,865467	0,097881
73	35	30	48	0,338654	3,542427	0,090764
74	50	30	48	0,306899	3,219387	0,084545
75	65	30	48	0,275144	2,896347	0,079044
76	5	45	20	0,33112	3,904474	0,097332
77	20	45	20	0,299365	3,581434	0,088399
78	35	45	20	0,26761	3,258394	0,080531
79	5	45	27	0,340766	3,973326	0,098795
80	20	45	27	0,309011	3,650286	0,089831
81	35	45	27	0,277256	3,327246	0,081965
82	5	45	34	0,350412	4,042178	0,100231
83	20	45	34	0,318657	3,719138	0,091230
84	35	45	34	0,286902	3,396098	0,083360
85	5	45	41	0,360058	4,11103	0,101642
86	20	45	41	0,328303	3,78799	0,092600
87	35	45	41	0,296548	3,46495	0,084718
88	5	45	48	0,369704	4,179882	0,103030
89	20	45	48	0,337949	3,856842	0,093941
90	35	45	48	0,306194	3,533802	0,086043
91	5	60	20	0,29866	3,895849	0,092916
92	20	60	20	0,266905	3,572809	0,083067
93	35	60	20	0,23515	3,249769	0,074320
94	5	60	27	0,308306	3,964701	0,094619
95	20	60	27	0,276551	3,641661	0,084744
96	35	60	27	0,244796	3,318621	0,076014
97	5	60	34	0,317952	4,033553	0,096290
98	20	60	34	0,286197	3,710513	0,086381
99	35	60	34	0,254442	3,387473	0,077660
100	5	60	41	0,327598	4,102405	0,097929
101	20	60	41	0,295843	3,779365	0,087982
102	35	60	41	0,264088	3,456325	0,079262
103	5	60	48	0,337244	4,171257	0,099540
104	20	60	48	0,305489	3,848217	0,089548
105	35	60	48	0,273734	3,525177	0,080821



## ПРИЛОЖЕНИЕ П 6

### Статистический анализ данных по исследованию теплофизических свойств экстрактов боярышника кроваво-красного

#### Теплопроводность

N=105	Regression Summary for Dependent Variable: $\lambda$ пр.ср. (Данные по теплопроводности боярки) R= ,92803797 R <sup>2</sup> = ,86125448 Adjusted R <sup>2</sup> = ,85713333 F(3,101)=208,98 p<0,0000 Std.Error of estimate: ,02316					
	Бета	Std.Err. of Beta	B	Std.Err. of B	t(101)	p-level
ОТРЕЗОК			0,371044	0,009296	39,9157	0,000000
Ссв, %масс.	-0,323068	0,037110	-0,001108	0,000127	-8,7057	0,000000
Ссп, %об.	-0,773720	0,037105	-0,002072	0,000099	-20,8522	0,000000
t, °C	0,421053	0,037069	0,002594	0,000228	11,3587	0,000000

#### Теплоемкость

N=105	Regression Summary for Dependent Variable: c, кДж/(кг •К) (Данные по теплоемкости боярки) R= ,96125711 R <sup>2</sup> = ,92401522 Adjusted R <sup>2</sup> = ,92175825 F(3,101)=409,40 p<0,0000 Std.Error of estimate: ,10904					
	Бета	Std.Err. of Beta	B	Std.Err. of B	t(101)	p-level
ОТРЕЗОК			3,733037	0,043761	85,3046	0,000000
Ссв, %масс.	-0,892590	0,027463	-0,019483	0,000599	-32,5019	0,000000
Ссп, %об.	0,024118	0,027459	0,000411	0,000468	0,8783	0,381857
t, °C	0,338675	0,027432	0,013272	0,001075	12,3459	0,000000

#### Температуропроводность

N=105	Regression Summary for Dependent Variable: $a * 10^6, м^2/с$ (Данные по темп-ти боярки) R= ,97161886 R <sup>2</sup> = ,94404320 Adjusted R <sup>2</sup> = ,94238112 F(3,101)=567,99 p<0,0000 Std.Error of estimate: ,00159					
	Бета	Std.Err. of Beta	B	Std.Err. of B	t(101)	p-level
ОТРЕЗОК			0,097994	0,000663	147,7385	0,000000
Ссв, %масс.	-0,514843	0,024517	-0,000168	0,000008	-20,9990	0,000000
Ссп, %об.	-0,755801	0,024517	-0,000246	0,000008	-30,8271	0,000000
t, °C	0,570557	0,023538	0,000381	0,000016	24,2400	0,000000

## ПРИЛОЖЕНИЕ П 7

### Статистический анализ данных по исследованию теплофизических свойств экстрактов калины обыкновенной

#### Теплопроводность

N=105	Regression Summary for Dependent Variable: $\lambda$ , Вт/м·К (Теплопроводность калины) R= ,97640232 R?= ,95336150 Adjusted R?= ,95197619 F(3,101)=688,20 p<0,0000 Std.Error of estimate: ,01112					
	Бета	Std.Err. of Beta	B	Std.Err. of B	t(101)	p-level
ОТРЕЗОК			0,411525	0,004407	93,3891	0,000000
Ссв, %масс.	-0,695257	0,021560	-0,002117	0,000066	-32,2480	0,000000
Ссп, %об.	-0,686740	0,021559	-0,002164	0,000068	-31,8537	0,000000
t, °C	0,270046	0,021489	0,001378	0,000110	12,5665	0,000000

#### Теплоемкость

N=105	Regression Summary for Dependent Variable: $c$ , кДж/(кг·К) (Теплоемкость калины) R= ,98358427 R?= ,96743803 Adjusted R?= ,96647084 F(3,101)=1000,3 p<0,0000 Std.Error of estimate: ,06928					
	Бета	Std.Err. of Beta	B	Std.Err. of B	t(101)	p-level
ОТРЕЗОК			3,841309	0,027450	139,9374	0,000000
Ссв, %масс.	-0,948887	0,018015	-0,021536	0,000409	-52,6731	0,000000
Ссп, %об.	-0,024480	0,018014	-0,000575	0,000423	-1,3589	0,177200
t, °C	0,258570	0,017956	0,009836	0,000683	14,4004	0,000000

#### Температуропроводность

N=105	Regression Summary for Dependent Variable: $a \cdot 10^6$ , м2/с (Данные по темп-ти калины) R= ,98444357 R?= ,96912914 Adjusted R?= ,96821219 F(3,101)=1056,9 p<0,0000 Std.Error of estimate: ,00166					
	Бета	Std.Err. of Beta	B	Std.Err. of B	t(101)	p-level
ОТРЕЗОК			0,108502	0,000689	156,2161	0,000000
Ссв, %масс.	-0,922472	0,018211	0,000010	0,000008	-50,6560	0,000000
Ссп, %об.	-0,652138	0,018211	-0,000596	0,000008	-35,8110	0,000000
t, °C	0,172031	0,017483	0,000124	0,000016	9,8400	0,000000

Результаты исследования теплообмена при деалкоголизации и концентрировании жидких пищевых продуктов в роторном распылительном испарителе

№ п/п	$C_{CB}$ , %масс.	$C_{СП}$ , %об.	$V_{ВОЗД} \cdot 10^5$ , м <sup>3</sup> /с	$p$ , кПа	$t_{В.Н.}$ , °С	$V_H \cdot 10^6$ , м <sup>3</sup> /с	$\varepsilon$	$\Delta\varepsilon$ , в % от $\varepsilon$ при $V_H=0$ м <sup>3</sup> /с	$K$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	$\alpha_1$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	$\alpha_2$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
РАСТВОР ХЛОРИСТОГО НАТРИЯ											
1	8	-	0	88	92	8,33	0,635	0	736,22	1770,35	1472,44
2	8	-	2,25	88	92	8,33	0,613	3,4	745,21	1796,4	1490,41
3	8	-	3,56	88	92	8,33	0,597	5,9	758,1	1833,59	1516,2
4	8	-	4,86	88	92	8,33	0,592	6,8	793,63	1939,01	1587,27
5	8	-	6,17	88	92	8,33	0,583	8,1	837,51	2071,6	1675,03
6	8	-	0	88	96	8,33	0,610	0	766,78	1859,45	1533,56
7	8	-	2,25	88	96	8,33	0,593	2,8	779,72	1897,63	1559,44
8	8	-	3,56	88	96	8,33	0,589	3,4	794,25	1940,84	1588,5
9	8	-	4,86	88	96	8,33	0,586	3,9	816,02	2006,24	1632,04
10	8	-	6,17	88	96	8,33	0,578	5,3	852,11	2116,43	1704,22
11	8	-	0	88	100	8,33	0,576	0	807,36	1980,12	1614,71
12	8	-	2,25	88	100	8,33	0,570	1	817,65	2011,18	1635,31
13	8	-	3,56	88	100	8,33	0,565	2	831,8	2054,14	1663,6
14	8	-	4,86	88	100	8,33	0,556	3,5	867,8	2165	1735,57
15	8	-	6,17	88	100	8,33	0,548	4,9	907	2288,35	1813,95
16	8	-	0	92	92	8,33	0,615	0	748,78	1806,78	1497,55
17	8	-	2,25	92	92	8,33	0,608	1,1	753,58	1820,76	1507,16
18	8	-	3,56	92	92	8,33	0,596	3	767,03	1860,18	1534,05
19	8	-	4,86	92	92	8,33	0,590	4	799,2	1955,64	1598,4
20	8	-	6,17	92	92	8,33	0,587	4,5	828,11	2042,89	1656,21

Продолжение приложения П 8

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
21	8	-	0	92	96	8,33	0,606	0	776,4	1887,83	1552,8
22	8	-	2,25	92	96	8,33	0,593	2,2	780,53	1900,04	1561,06
23	8	-	3,56	92	96	8,33	0,585	3,5	786,83	1918,73	1573,66
24	8	-	4,86	92	96	8,33	0,559	7,8	817,86	2011,82	1632,73
25	8	-	6,17	92	96	8,33	0,550	9,3	853,32	2120,16	1706,64
26	8	-	0	92	100	8,33	0,562	0	812,69	1996,19	1625,38
27	8	-	2,25	92	100	8,33	0,557	0,9	818,09	2012,5	1636,18
28	8	-	3,56	92	100	8,33	0,545	2,9	828,94	2045,44	1657,89
29	8	-	4,86	92	100	8,33	0,534	4,8	861,89	2146,69	1723,78
30	8	-	6,17	92	100	8,33	0,503	10,4	907,6	2290,33	1815,2
31	8	-	0	96	92	8,33	0,612	0	758,38	1834,82	1516,76
32	8	-	2,25	96	92	8,33	0,603	1,4	769,34	1866,99	1538,68
33	8	-	3,56	96	92	8,33	0,596	2,5	780	1898,44	1560
34	8	-	4,86	96	92	8,33	0,588	3,9	808,54	1983,67	1617,07
35	8	-	6,17	96	92	8,33	0,572	6,6	848,79	2106,19	1697,57
36	8	-	0	96	96	8,33	0,604	0	775,02	1883,75	1550,05
37	8	-	2,25	96	96	8,33	0,592	2	785,42	1914,55	1570,84
38	8	-	3,56	96	96	8,33	0,584	3,2	801,86	1963,6	1603,7
39	8	-	4,86	96	96	8,33	0,557	7,7	829,37	2046,75	1658,75
40	8	-	6,17	96	96	8,33	0,549	9	899,22	2263,72	1798,44
41	8	-	0	96	100	8,33	0,550	0	831,05	2051,86	1662,1
42	8	-	2,25	96	100	8,33	0,545	0,9	865,11	2156,7	1730,23
43	8	-	3,56	96	100	8,33	0,535	2,7	885,03	2305,85	1770,06
44	8	-	4,86	96	100	8,33	0,526	4,3	912,47	2218,93	1824,93
45	8	-	6,17	96	100	8,33	0,483	12,2	982,35	2533,59	1964,7

Продолжение приложения П 8

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
46	8	-	0	96	100	8,33	0,550	0	831,05	2051,86	1662,1
47	8	-	2,25	96	100	8,33	0,545	09	865,11	2156,69	1730,23
48	8	-	3,56	96	100	8,33	0,535	2,7	885,03	2218,93	1770,06
49	8	-	4,86	96	100	8,33	0,512	6,9	912,47	2305,85	1824,93
50	8	-	6,17	96	100	8,33	0,483	12,2	982,35	2533,59	1964,7
51	8	-	0	96	100	13,9	0,683	0	830,08	2048,9	1660,17
52	8	-	2,25	96	100	13,9	0,676	1	855,83	2127,9	1711,65
53	8	-	3,56	96	100	13,9	0,652	4,5	859,46	2139,17	1718,93
54	8	-	4,86	96	100	13,9	0,642	6	887,11	2225,48	1774,22
55	8	-	6,17	96	100	13,9	0,612	10,4	970,54	2494,45	1941,09
56	8	-	0	96	100	19,4	0,791	0	762,53	1847	1525,07
57	8	-	2,25	96	100	19,4	0,784	0,9	764,49	1852,73	1528,98
58	8	-	3,56	96	100	19,4	0,779	1,5	779,43	1896,78	1558,86
59	8	-	4,86	96	100	19,4	0,758	4,2	822,56	2026,03	1645,11
60	8	-	6,17	96	100	19,4	0,748	5,4	930,7	2364,37	1861,4
<b>ВОДНО-СПИРТОВОЙ РАСТВОР</b>											
61	-	5	6,17	96	84	8,33	0,719	-	562,15	1290,06	1124,3
62	-	2,92	6,17	96	84	8,33	0,733	-	586,18	1353,74	1172,36
63	-	1,53	6,17	96	84	8,33	0,769	-	593,89	1374,35	1187,78
64	-	5	6,17	96	100	8,33	0,658	-	747,66	1803,52	1495,31
65	-	3,41	6,17	96	100	8,33	0,660	-	758,55	1835,32	1517,11
66	-	5	6,17	96	84	13,8	0,799	-	687,69	1631,90	1375,39
67	-	2,43	6,17	96	84	13,8	0,819	-	725,75	1740,18	1451,51
68	-	1,32	6,17	96	84	13,8	0,820	-	728,48	1748,03	1456,96
69	-	5	6,17	96	100	13,8	0,773	-	709,93	1694,89	1419,86
70	-	3,2	6,17	96	100	13,8	0,782	-	726,38	1741,98	1452,76

Продолжение приложения П 8

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
71	-	1,81	6,17	96	100	13,8	0,784	-	737,93	1775,30	1475,93
<b>ЭКСТРАКТЫ БОЯРЫШНИКА КРОВАВО-КРАСНОГО</b>											
72	16,6	43	6,17	96	84	16,6	0,638	-	653,92	1949,63	1018,55
73	25	20,06	6,17	96	84	13,8	0,621	-	783,83	2242,18	1164,78
74	38,3	0	6,17	96	100	8,3	0,647	-	592,51	1538,17	1194,91
75	9,6	8,69	6,17	96	84	16,6	0,828	-	592,74	1783,22	988,12
76	11,4	5,1	6,17	96	84	16,6	0,825	-	583,36	1655,47	1004,15
77	13,2	3,3	6,17	96	84	13,8	0,779	-	523,86	1359,37	944,31
78	16,4	0	6,17	96	100	8,3	0,624	-	471,86	1108,82	1406,5
<b>ЭКСТРАКТЫ КАЛИНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ</b>											
79	16,2	34,21	6,17	96	84	12,5	0,641	-	483,82	1269,26	858,56
80	25	13,65	6,17	96	84	16,6	0,785	-	615,05	1848,03	1030,43
81	33	8,11	6,17	96	84	12,5	0,770	-	514,94	1456,28	876,43
82	42,2	0	6,17	96	100	9,7	0,708	-	512,35	1282,2	1545,56
83	9,7	14,14	6,17	96	84	8,33	0,645	-	628,80	1681,39	1031,9
84	14,4	3,6	6,17	96	84	8,33	0,672	-	672,39	1807,22	1121,38
85	19,6	0	6,17	96	100	8,33	0,568	-	650,45	1646,91	1580,08

**ПРИЛОЖЕНИЕ П 9**

**Результаты расчета коэффициента теплоотдачи в греющей рубашке РРИ  
при деалкоголизации и концентрировании пищевых смесей**

N=85	Reg. Sum. for Dep. Variable: $\alpha_2$ , Вт/(м <sup>2</sup> К) (Расчет коэф. теплоотдачи) R= ,95979294 R <sup>2</sup> = ,92120248 Adjusted R <sup>2</sup> = ,91928059 F(2,82)=479,32 p<0,0000 Std.Error of estimate: 58,212					
	Бета	Std.Err. of Beta	B	Std.Err. of B	t(82)	p-level
ОТРЕЗОК			-1296,69	110,2500	-11,7614	0,000000
$V_{ВОЗД} \times 10^5, м^3/с$	-0,176327	0,032711	-16,33	3,0298	-5,3905	0,000001
$t_{В.Н} \text{ } ^\circ\text{C}$	0,888846	0,032711	30,18	1,1105	27,1730	0,000000

Гриценко Вячеслав Владимирович

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МАШИННО-АППАРАТУРНОГО  
ОФОРМЛЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА ЖИДКИХ  
КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РОТОРНОГО РАСПЫЛИТЕЛЬНОГО  
ВЫПАРНОГО АППАРАТА

Монография

Редактор Е.Ф. Изотова

Подписано к печати 24.04.14. Формат 60x84 /16.

Усл. печ. л. 8,44. Тираж 50 экз. Заказ 14 1258. Рег. №111.

Отпечатано в РИО Рубцовского индустриального института  
658207, Рубцовск, ул. Тракторная, 2/6.