

На правах рукописи

ЕМЕЛЬЯНОВ КОНСТАНТИН АЛЕКСАНДРОВИЧ

**АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ
УДАЛЕНИЯ ВЛАГИ В ВАКУУМНЫХ ВЫПАРНЫХ УСТАНОВКАХ**

05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами (промышленность)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Орел – 2012

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс»

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор,
Емельянов Александр Александрович

Официальные оппоненты – **Раков Владимир Иванович**
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВПО «Госуниверситет - УНПК»,
профессор кафедры «Информационные
Системы»

Трофимов Валерий Владимирович
доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ
ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский
государственный университет экономики и
финансов», заведующий кафедрой
«Информатика»

Ведущая организация: ФГАОУ ВПО «Белгородский государственный
национальный исследовательский университет»
(г. Белгород)

Защита состоится «30» октября 2012 г. в 16 ч 00 мин на заседании диссертационного совета Д212.182.01 при ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК» по адресу: 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, д. 29, ауд. 212.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК».

Автореферат разослан «28» сентября 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.182.01
кандидат технических наук, доцент

_____ Волков Вадим Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В химической, фармацевтической, пищевой и перерабатывающей промышленности широко используется процесс удаления влаги, реализуемый при различных способах подвода энергии (конвективный, распылительный, сублимационный, электромагнитным полем и др.). Одним из перспективных способов удаления влаги является вакуумное выпаривание, протекающее при пониженных температурах и позволяющее минимизировать потери биологической ценности сырья и сохранять его природную влагу.

К настоящему времени достигнуты существенные результаты в области ресурсосберегающей переработки плодово-ягодного сырья. Разработаны устройства и методы выпаривания, исследованы физико-химические свойства обезвоженных соков, сухих выжимок и природной влаги. Однако выпаривание соков в вакууме исследовано не достаточно, методы пеноподавления и выпаривания не отработаны, сбор и обработка информации о состоянии процесса выпаривания осуществляются в ручном режиме, не автоматизированы основные технологические процессы. Использование современных средств автоматизации в процессе вакуумного выпаривания позволит повысить эффективность управления и качество продуктов переработки, сократит трудовые затраты, заложит основы для создания новых образцов техники. В связи с чем, разработка новых методов, средств автоматического управления и автоматизированного сбора и обработки информации, при выпаривании плодово-ягодных соков в вакууме является актуальной научной задачей.

Работа выполнена по приоритетному направлению развития науки, технологий и техники РФ «Технологии экологически безопасного ресурсосберегающего производства и переработки сельскохозяйственного сырья и продуктов питания» (утверждено указом Президента РФ от 21 мая 2006 года № Пр-842).

Проведенные исследования основаны на работах отечественных и зарубежных ученых: Л.П. Брусиловский, В.А. Домарецкий, А.В. Лыков, А.Г. Касаткин, Ю.В. Касьянов, Л.М. Мандельштейн, С.П. Рудобашта и др.

Объектом исследования является технологический процесс удаления влаги в вакуумных выпарных установках.

В качестве **предмета исследования** выступают алгоритмы, методы и средства автоматизации процесса выпаривания соков в вакууме.

Целью работы является повышение производительности и улучшение качества готовой продукции в процессе удаления влаги в вакууме.

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

- анализ средств автоматизации технологических процессов удаления влаги в вакууме;
- математическое моделирование выпаривания соков в вакууме;
- разработка экспериментальной установки и исследование процесса выпаривания в вакууме;
- разработка методов реализации вакуумного выпаривания;
- разработка устройств автоматического пеноподавления и выпаривания соков в вакууме;

- разработка программно-технического комплекса автоматизированного сбора и обработки данных управления процессом выпаривания.

Методы и средства исследования. При решении поставленных задач использовались теории автоматизированных систем управления технологическими процессами, алгоритмов и структур данных, объектно-ориентированного программирования и технологии разработки программного обеспечения и баз данных.

Научная новизна

1. Предложена математическая модель процесса выпаривания сока в вакууме, основанная на периодах постоянной и падающей скорости удаления влаги и отличающаяся использованием разных коэффициентов скорости выпаривания на периоде падающей скорости.

2. Разработан алгоритм управления выпариванием соков в вакууме, включающий операцию подавления пенообразования и отличающийся введением временных границ конденсации влаги.

3. Разработана методика оценки параметров процесса выпаривания на программно-техническом комплексе, основанная на контроле уровня пенообразования, температуры в испарителе, давления в системе, поступления конденсата в процессе выпаривания плодово-ягодных соков.

Практическая значимость

Предложена структура и разработан программно-технический комплекс автоматизированного сбора и представления данных управления процессом удаления влаги в вакууме.

Разработаны программа и база данных (БД), повышающие эффективность управления выпариванием плодово-ягодных соков в вакууме (свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011615036 и БД № 2011620474).

Разработаны устройства (патенты РФ №№ 2276314, 2316701, 2327092, 2432537, 2455596) и способы (патенты РФ №№ 2328170, 2367863) выпаривания плодово-ягодных соков в вакууме с получением биологически активных продуктов переработки.

Достигнуто повышение качества готовой продукции в результате вакуумного выпаривания.

Реализация и внедрение результатов работы

Работа выполнена в рамках:

- Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг. по государственному контракту с Министерством образования и науки РФ № 14.740.11.0513 от 01.10.2010 г. «Исследование выпаривания плодово-ягодных соков в вакууме с разработкой автоматизированной системы сбора и обработки данных и устройства автоматического управления;

- Федеральной программы «СТАРТ 11» по государственному контракту с «Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» № 9314р/15109 от 30.05.2011 «Разработка установки для глубокой переработки плодово-ягодного сырья с непрерывным циклом получения биологически активных пищевых продуктов».

Результаты работы использованы в научных исследованиях на кафедрах “Автоматизированные станочные и инструментальные системы”, “Технология машиностроения и конструкторско-технологическая информатика”, “Технология хлебопекарного, кондитерского и макаронного производства” ФГБОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК» (г. Орел), “Технология мяса и мясных продуктов” ФГОУ ВПО ОрелГАУ (г. Орел), “Коммерция и товароведение” Воронежского филиала РГТЭУ (г. Воронеж).

Разработанные методы и устройства использованы в ЗАО НПО “ЕВРОПА-БИОФАРМ” (г. Волгоград) при вакуумном выпаривании сока мякоти арбуза с получением биологически активных пищевых продуктов. Ведутся работы по внедрению разработанных технических решений в ресурсосберегающую переработку бахчевых культур Волгоградской области.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель процесса выпаривания плодово-ягодных соков в вакууме.
2. Алгоритм и устройство автоматического управления выпариванием соков в вакууме.
3. Методика оценки параметров процесса вакуумного выпаривания плодово-ягодных соков на программно-техническом комплексе.

Апробация работы. Основные результаты исследований, выполненных по теме диссертации, представлены на Международных и Всероссийских конференциях: XI и X Международные научно-практические конференции “Фундаментальные и прикладные исследования. Разработка и применение высоких технологий в промышленности”, Санкт-Петербург, 2011 г., 2010 г.; Международная научно-практическая конференция “Наука и техника в современном мире”, Новосибирск, 2011 г.; Международная научно-практическая конференция “Инновационные технологии – основа модернизации отраслей производства и переработки сельскохозяйственной продукции”, Волгоград, 2011 г.; XIV научно-техническая конференция “Вакуумная наука и техника”, Сочи, 2009 г.; VI Международная научно-практическая конференция “Биотехнология. Вода и пищевые продукты”, Москва, 2008 г.; VIII Международная научно-техническая конференция “Фундаментальные и прикладные проблемы в машиностроительном комплексе. Технология 2007”, Орел – Helsinki, Finland, 2007 г.

Результаты исследований отмечены Почетной грамотой Министерства сельского хозяйства РФ, г. Москва, 2011 г.; благодарностью Орловского городского совета народных депутатов, г. Орел, 2010 г.; дипломами Правительства Орловской области, г. Орел, 2011 г.; Департамента экономики Орловской области, г. Орел, 2011 г.; конкурса инновационных проектов “Зворыкинская премия”, г. Москва, 2010 г.; смены “Инновации и техническое творчество” Всероссийского молодежного образовательного форума “Селигер-2010”, Селигер, 2010 г.; Международной НПК “Биотехнология. Вода и пищевые продукты”, г. Москва, 2008 г.; Третьей Российской НТК “Вакуумная техника и технология”, г. Казань, 2007 г.

Публикации. По результатам исследования опубликовано 19 работ, включая 3 статьи в журналах, входящих в перечень ВАК РФ, 7 патентов РФ на изобретения и 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ и БД.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы и приложений. Работа изложена на 188 страницах машинописного текста, включающего 39 рисунка, 4 таблиц, список литературы из 117 наименований и 9 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы её цель, задачи, научная новизна, практическая значимость и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен обзор работ, посвященных выпарным и сушильным устройствам. Показана перспективность выпаривания натуральных соков в вакууме и необходимость повышения эффективности выпаривания путем автоматизации технологических процессов. Проведен обзор методов и средств автоматизации процессов вакуумного выпаривания.

Во второй главе рассмотрена математическая модель сушки. Область применения модели сушки расширена на процесс выпаривания плодово-ягодных соков в вакууме при неравномерном удалении влаги.

Рассмотрен процесс влагообмена при выпаривании плодово-ягодных соков в вакууме. Показано, что кривая скорости удаления влаги $dU/d\tau = f(U)$, получаемая при вакуумном выпаривании, включает периоды постоянной и падающей скорости. В пренебрежении термовлагопроводностью и предположении перемещения влаги с постоянным коэффициентом влагообмена $a_m = \text{const}$ в одном направлении, равномерности распределения влаги по сечению и постоянной интенсивности испарения с поверхности уравнение влагообмена для периода постоянной скорости выпаривания принимает вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial \tau} = a_m \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}, \\ U(0, x) = U_H, \\ -a_m \frac{dU}{dx} \Big|_{\text{пов}} = \beta(U_{\text{п}} - U_{\text{р}}), \end{cases} \quad (1)$$

где $U = G_{\text{вл}}/G_{\text{с}}$ – влажность материала, определенная отношением массы $G_{\text{вл}}$, содержащейся в нем влаги, к массе $G_{\text{с}}$ сухого вещества; $U_{\text{н}}$, $U_{\text{п}}$, $U_{\text{р}}$ – начальная, поверхностная и равновесная влажности, соответственно; β – коэффициент влагопроницаемости.

В результате интегрирования (1) получена продолжительность периода постоянной скорости выпаривания

$$\tau_1 = \frac{U_{\text{н}} - U_{\text{к1}}}{v_1}, \quad (2)$$

где v_1 – скорость выпаривания периода постоянной скорости, $U_{\text{к1}}$ – первая критическая влажность.

Для периода падающей скорости продолжительность процесса выражена через экспериментально определяемый коэффициент K скорости выпаривания

$$-\frac{dU}{d\tau} = K(U - U_p). \quad (3)$$

При неравномерном процессе период падающей скорости представлен в виде суммы участков с разными коэффициентами K_i скорости и разной продолжительностью τ_i удаления влаги. В результате интегрирования (3) определена продолжительность участков периода падающей скорости:

$$\tau_i = K_i^{-1} \ln \frac{U_{\kappa i-1} - U_{pi}}{U_i - U_{pi}}, \quad (4)$$

$$K_i = \frac{v_{i-1}}{U_{i-1} - U_{pi}}, \quad (5)$$

$$U_{pi} = \begin{cases} U_{\kappa i}, & i = 2, \dots, n-1, \\ U_{\kappa}, & i = n, \end{cases} \quad (6)$$

где v_{i-1} – начальная скорость i -го участка; U_{κ} – конечная влажность.

При неравномерном процессе общая продолжительность удаления влаги, определяемая суммой продолжительностей всех участков, рассчитывается по основным параметрам процесса

$$\tau = \frac{U_H - U_{\kappa 1}}{v_1} + \sum_{i=2}^n K_i^{-1} \ln \frac{U_{\kappa i-1} - U_{pi}}{U_i - U_{pi}}. \quad (7)$$

Третья глава посвящена изучению объекта исследования.

Разработано вакуумное выпарное устройство (Рис. 1). На устройство получен патент РФ (№ 2276314).

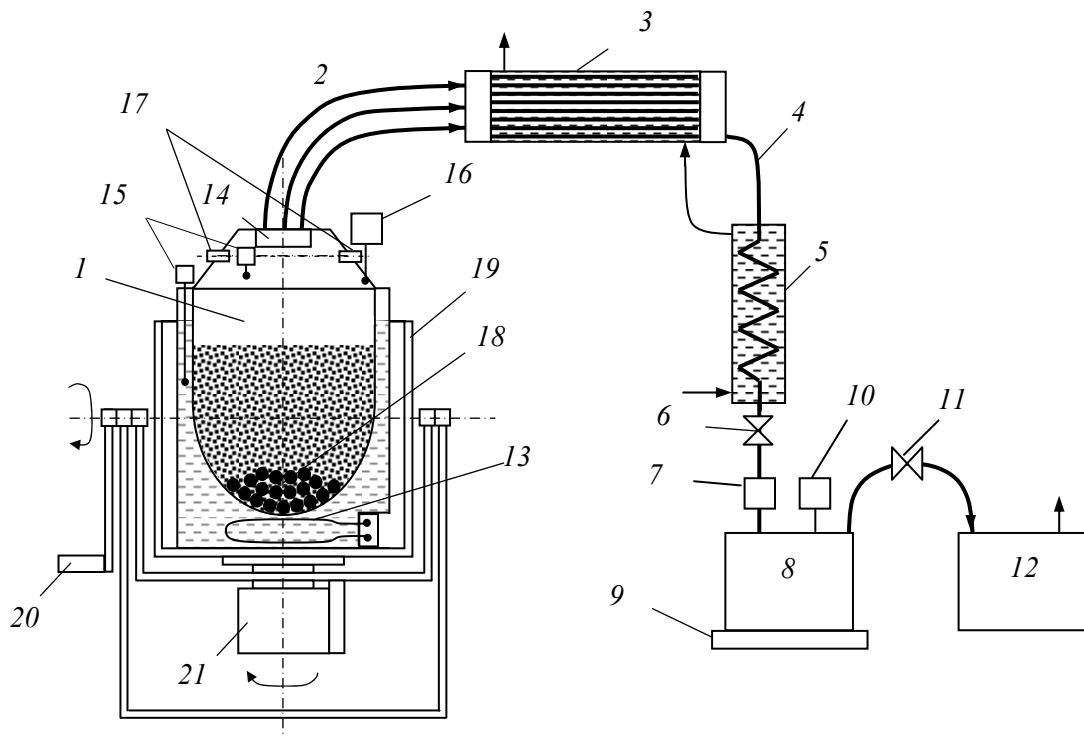


Рис. 1. Блок схема вакуумного выпарного устройства: 1 – испаритель; 2 – паропровод; 3, 5 – конденсаторы; 4 – трубопровод; 6 – клапан; 7 – пьезодатчик; 8 – сборник конденсата; 9 – тензодатчик; 10 – датчик давления в системе; 11 – вентиль; 12 – насос; 13 – электронагреватель; 14 – брызгоуловитель; 15 – датчики температуры; 16 – датчик давления в камере испарителя; 17 – оптопара; 18 – рабочие тела; 19 – ячейка с двумя осями вращения; 20 – рукоятка; 21 – привод колебательного движения.

Выполнены исследования дистилляции воды в вакууме. Получены экспериментальные зависимости удельной скорости выпаривания $w = W/V_0$, приведенной к объему загрузки V_0 , от времени $w(\tau)$ (Рис. 2). Показано, что шестикратное увеличение мощности нагрева в диапазоне $2,2 \leq N \leq 13,2$ кВт сокращает время запаздывания выпаривания в ~ 3 раза от 40 до 12 мин и время разгона в $\sim 2,5$ раза от 80 до 30 мин, повышает температуру выпаривания в $\sim 1,8$ раза от 32 до 59 °С.

Получены экспериментальные зависимости удельной скорости выпаривания от температуры $w(t)$ при разных значениях мощности нагрева (Рис. 3).

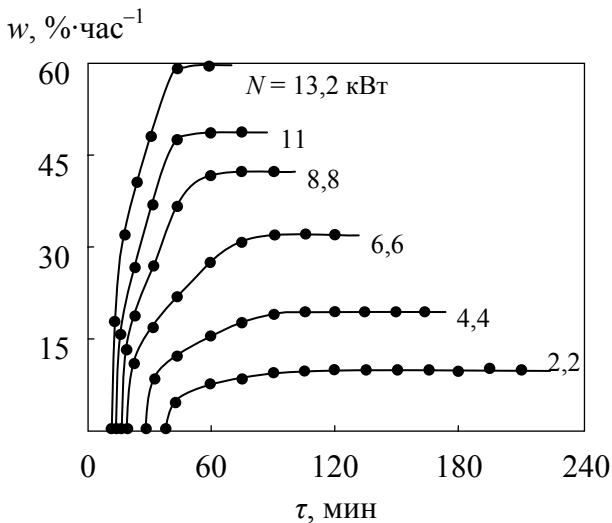


Рис. 2. Кривые удельной скорости выпаривания при разных значениях подведенной мощности.

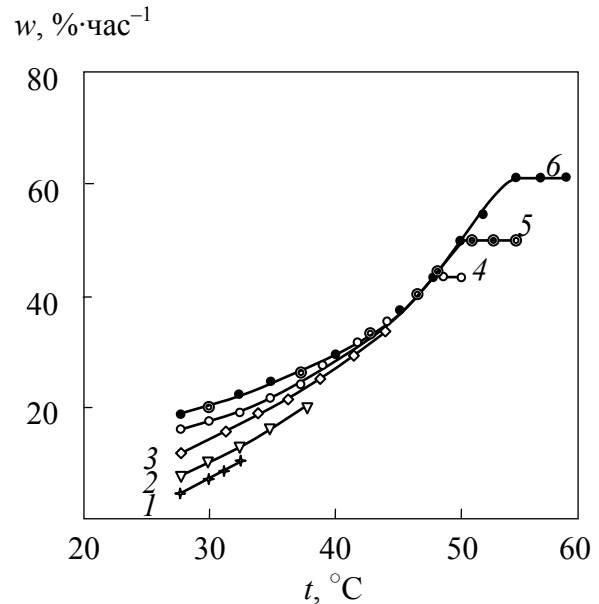


Рис. 3. Удельная скорость выпаривания как функция температуры при мощности нагрева: 1 – 2,2; 2 – 4,4; 3 – 6,6; 4 – 8,8; 5 – 11; 6 – 13,2 кВт.

Установлено, что начальная температура выпаривания t_H не зависит от подведенной мощности N , определяется остаточным давлением p_H и составляет $t_H \approx 28$ °С. Начальная производительность w_H возрастает в 4,75 раза от 4 до 19 %·час⁻¹ при увеличении мощности от 2,2 до 13,2 кВт. Конечная температура t_K зависит от мощности N и возрастает в 1,8 раза от 32 до 59 °С при увеличении мощности от 2,2 до 13,2 кВт. Превышение мощностью критического значения, составившего $N \approx 8$ кВт, сопровождается выходом кривых $w(t)$ в область насыщения. Ширина участков насыщения возрастает с увеличением мощности от 8,8 до 13,2 кВт, что указывает на ограниченность производительности установки пропускной способностью участка паропровод – горизонтальный конденсатор. В установившемся режиме производительность определена мощностью нагрева. Шестикратное увеличение мощности N от 2,2 до 13,2 кВт обеспечивает шестикратный рост производительности от 10 до 60 %·час⁻¹.

Оптимизирован режим выпаривания. Достигнута максимальная производительность по выпаренной влаге $w/N = 5$ %·(кВт·час)⁻¹ (Рис. 4).

Увеличение мощности N от 2,2 до 8 кВт повышает производительность выпаривания на величину от 4,5 до 5 %·(кВт·час)⁻¹. Повышение обеспечено более эффек-

тивным использованием подведенной мощности за счет снижения потерь в окружающую среду. Дальнейшее увеличение мощности нагрева от 8 до 13,2 кВт снижает удельную производительность на 11 % из-за роста потерь в окружающую среду.

Выполнены исследования выпаривания плодово-ягодных соков в вакууме. Разработаны устройства охлаждения дистиллята (патент РФ № 2316701) и защиты конденсата от брызг кипящего продукта (патент РФ № 2327092). Предложен метод подавления пены в вакууме, возникающей при выпаривании плодово-ягодных соков. Метод основан на контроле уровня пены и регулировании остаточного давления в испарителе при отключенном нагреве. Техническая реализация метода защищена патентом на изобретение (патент РФ № 2328170). Предложен способ удаления влаги в вакууме (патент РФ № 2367863), использующий предварительный нагрев сока и создание импульса разрежения.

Определены параметры математической модели при выпаривании черносмородинового сока. Экспериментальная кривая скорости выпаривания сока черной смородины приведена на рис. 5.

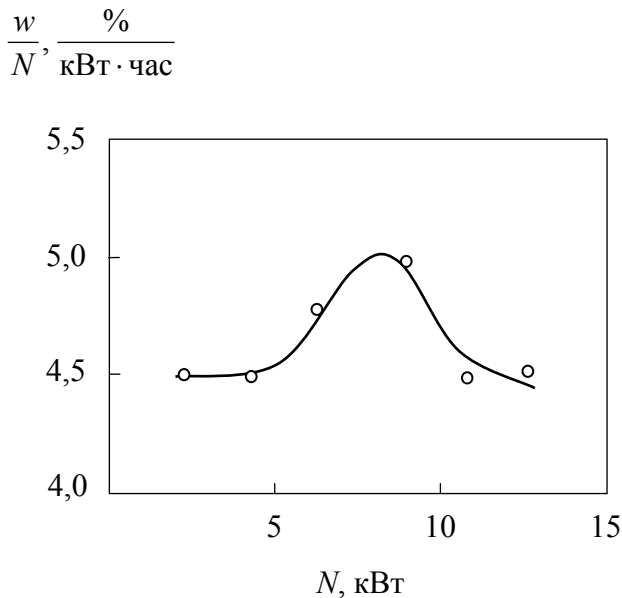


Рис. 4. Удельная производительность в установившемся режиме как функция мощности нагрева.

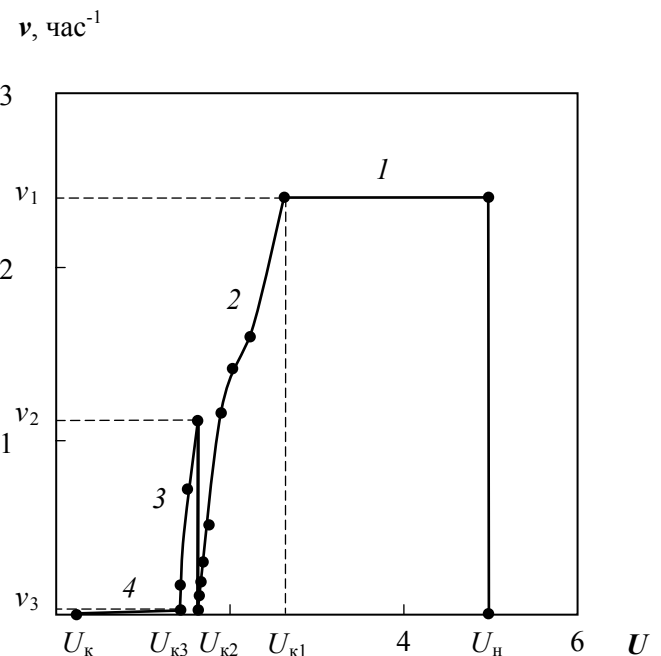


Рис. 5. Кривая скорости выпаривания сока черной смородины в вакууме.

Начальная, критические и конечная влажности, а также начальные скорости участков для кривой $v(U)$ составили: $U_n = 5,0$; $U_{k1} = 2,7$; $U_{k2} = 1,6$; $U_{k3} = 1,4$; $U_k = 0,18$; $v_1 = 2,4 \text{ час}^{-1}$; $v_2 = 1,1 \text{ час}^{-1}$; $v_3 = 0,03 \text{ час}^{-1}$. По перепадам влажности и начальным скоростям рассчитаны коэффициенты скорости выпаривания, час^{-1} : $K_2 = 2,2$; $K_3 = 5,5$; $K_4 = 0,024$, – и продолжительности выпаривания участков, час: $\tau_1 = 0,96$; $\tau_2 = 2,0$; $\tau_3 = 0,63$; $\tau_4 = 196$. Общая продолжительность выпаривания сока черной смородины, определяемая суммой продолжительностей выпаривания отдельных участков, составила $\tau = 200$ час. Результаты расчетов удовлетворяют экспериментальным данным с относительной погрешностью менее 5 %.

Интенсивность испарения влаги $m = G_{\text{вл}} / F\tau$, определяемая средней скоростью испарения с единицы поверхности F , на отдельных участках процесса составила, кг/(м²·час): $m_1 = 63$; $m_2 = 10,2$; $m_3 = 5,7$; $m_4 = 8,5 \cdot 10^{-3}$. Интенсивность испарения в период постоянной скорости выпаривания (участок 1) существенно выше интенсивности в период падающей скорости. На периоде падающей скорости наблюдаются участки с разными скоростями, когда превышение составляет от 6-кратного на участке 2 до четырех порядков величины на участке 4.

В четвертой главе разработаны алгоритм управления и устройства автоматического пеноподавления и выпаривания, структура программно-технического комплекса автоматизированного сбора и обработки данных.

Разработана методика оценки параметров процесса выпаривания плодово-ягодных соков в вакууме, включающая сбор, обработку, представление и хранение данных. Методика включает алгоритм управления процессом выпаривания, работу с устройствами автоматического управления пеноподавлением и выпариванием, устройством сбора и обработки данных, по программе ЭВМ с использованием базы данных результатов эксперимента.

На рис 6. представлена структурная схема автоматизированной системы управления процессом выпаривания.

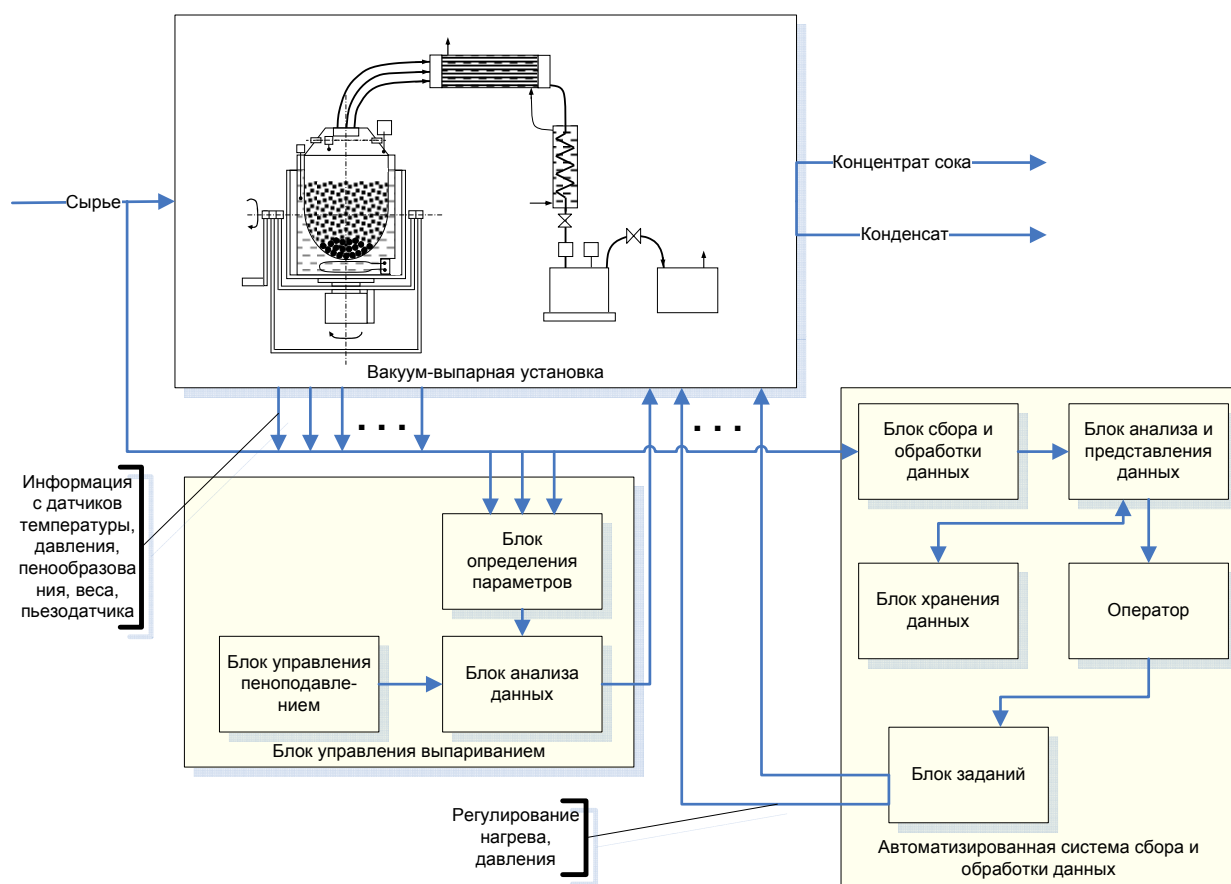


Рис. 6. Структурная схема автоматизированной системы управления процессом выпаривания.

Предложена двухуровневая система, с помощью которой можно решить функциональные задачи управления технологическим оборудованием. К нижнему уровню относится техническое обеспечение: система датчиков, система исполнительных механизмов, устройства автоматического пеноподавления и

выпаривания, устройство сбора и обработки данных. К верхнему уровню относятся программное обеспечение и база данных. Оператор получает информацию о состоянии процесса выпаривания, анализирует информацию и принимает меры по изменению управляющих воздействий.

Управление процессом выпаривания осуществляется по алгоритму, состоящему из трех этапов:

1. Прогрев продукта, сопровождаемый пенообразованием. Успешный прогрев возможен при непрерывном контроле и регулировании уровня пены в испарителе.
2. Удаление свободной влаги при контроле температуры в камере испарителя.
3. Удаление связанной влаги при контроле температуры рабочей жидкости в рубашке испарителя.

Алгоритм управления процессом выпаривания приведен на рис. 7.

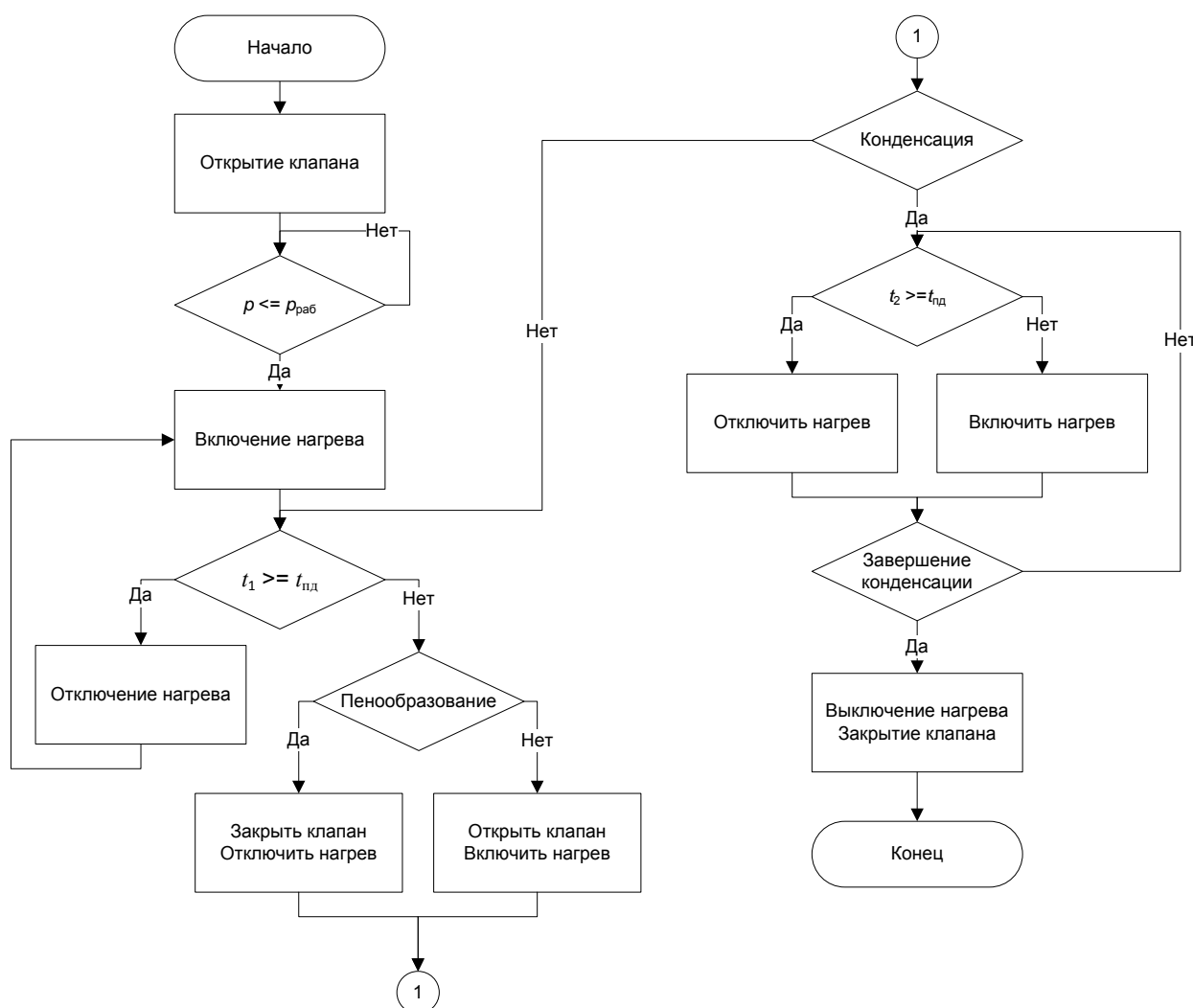


Рис. 7. Алгоритм управления процессом выпаривания.

Параметры алгоритма: $p_{раб}$ – рабочее давление в системе; $t_{нд}$ – предельно допустимая температура сока; t_1 и t_2 – температуры сока и рабочей жидкости в рубашке испарителя, соответственно.

В исходном состоянии клапан закрыт, нагревательные элементы отключены, температура в системе равна температуре окружающей среды. Переводом клапана в открытое состояние подключают вакуумный насос к системе. После достижения рабочего разрежения $p_{раб}$ происходит включение электронагревателя. Если $t_1 \geq t_{нд}$,

нагрев отключается. При превышении пеной критического уровня отключается нагрев и отсекается насос от испарителя. Появление конденсата характеризует завершение этапа прогрева и начало этапа удаления свободной влаги. На этапе удаления свободной влаги контролируют температуру сока в испарителе t_1 . На этапе удаления связанной влаги контролируют температуру рабочей жидкости t_2 . При $t_2 \geq t_{\text{пд}}$ отключаются нагрев. Прекращение конденсации характеризует завершение процесса выпаривания.

Для каждого этапа характерен набор параметров процесса выпаривания, основные из которых – температура, давление и время. Для поддержания параметров процесса разработаны устройства автоматического пеноподавления и выпаривания.

Разработано устройство автоматического подавления пенообразования при выпаривании плодово-ягодных соков в вакууме (патент РФ № 2432537). В качестве датчика уровня пены использована оптопара, по сигналу которой блок управления воздействует на вакуумный клапан с электромагнитным приводом и электронагреватель, обеспечивая регулирование остаточного давления и температуры в испарителе. Проведены испытания устройства при выпаривании сока черной смородины.

Разработано устройство автоматического управления выпариванием плодово-ягодных соков в вакууме (патент РФ № 2455596), внешний вид которого представлен на рис. 8.



Рис. 8. Внешний вид блока автоматического управления выпариванием.

Устройство управления включает в свой состав устройство автоматического пеноподавления, пьезодатчик ЗП-1-1 и преобразователь манометрический термопарный ПМТ-2, сигналы которых обеспечивают включение и выключение электронагревателей. Испытания устройства, проведенные при выпаривании яблочного сока, показали повышение эффективности процесса управления за счет перехода от ручного режима к автоматическому режиму.

Разработан программно-технический комплекс средств автоматизированной системы сбора и обработки данных управления процессом выпаривания (Рис. 9). Показания с датчиков температуры – ДТ1, ДТ2 (ДТС-024); давления – ДД1, ДД2 (ПМТ-2 и DMP-331); веса – ДВ (Мерадат К-10-А); пенообразования – О (светодиод АП1107А, фотодиод ФД265) передаются в устройство предварительного сбора и

обработки данных, оснащенное портами ввода/вывода, 24-битным аналогово-цифровым преобразователем (АЦП), жидкокристаллическим дисплеем, преобразователем интерфейса RS232-USB (ПИ), блоком питания (БП) и микроконтроллером (Atmel Atmega32).

Разработана программа ЭВМ (свидетельство о государственной регистрации № 2011615036), осуществляющая сбор, хранение и графическое представление информации процесса выпаривания. Хранение данных осуществляется в XML-структуре.

Разработана база данных процесса выпаривания влаги в вакууме (свидетельство о государственной регистрации № 2011620474).

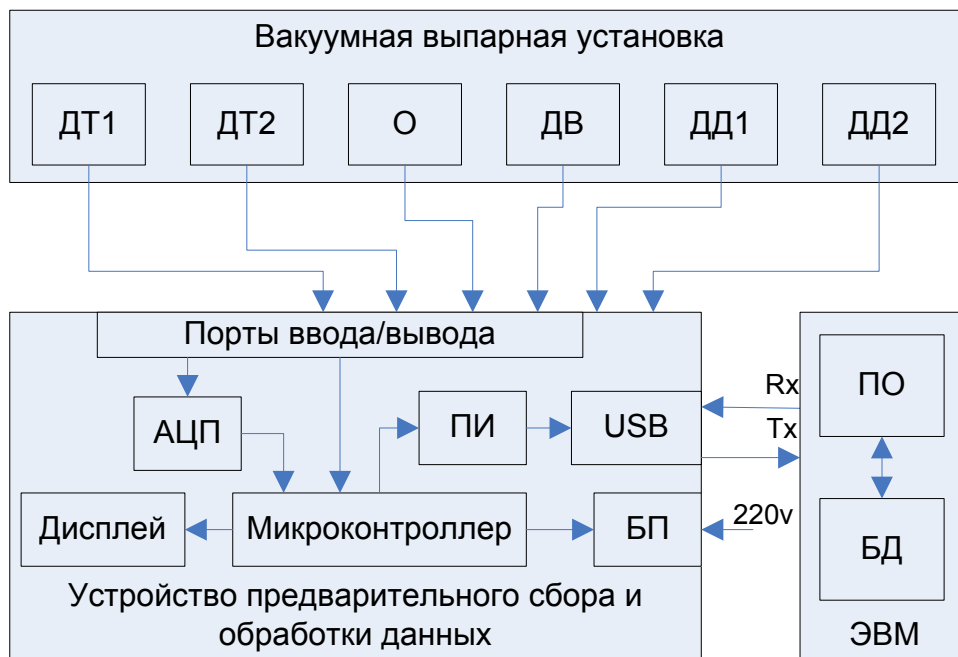


Рис. 9. Структурная схема автоматизированной системы сбора и обработки данных процесса выпаривания.

Проведены испытания устройств автоматического пеноподавления и управления выпариванием при удалении влаги из черносмородинового и яблочного соков. Достигнуто повышение эффективности процесса пеноподавления и управления выпариванием. Оценка эффективности по отношению к ручному режиму показала повышение качества обезвоженного сока, содержание витамина С в соке черной смородины выросло в 3,9 раза от 53 мг/100 г до 207 мг/100 г.

Испытания аппаратной части комплекса технических средств устройства автоматизированного сбора и представления данных управления процессом выпаривания проведены при одновременной обработке информации программной частью. Визуализация показаний измерительных преобразователей и автоматизация устройства сбора данных повысили эффективность управления процессом выпаривания за счет исключения человеческого фактора.

Предложенные в диссертационной работе устройства автоматического пеноподавления, управления выпариванием, программно-технический комплекс сбора и обработки данных при соответствующей модификации моделей и алгоритмов пригодны для обеспечения технологий аналогичной ориентации и использования в выпарных устройствах.

Основные результаты работы

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача повышения эффективности управления процессом выпаривания плодово-ягодных соков в вакууме. Получены следующие результаты:

1. Разработана математическая модель процесса выпаривания плодово-ягодных соков в вакууме. Период падающей скорости представлен в виде участков с разными коэффициентами скорости удаления влаги, определены начальная, критические и конечная влажности, а также начальные скорости участков процесса. Рассчитана общая продолжительность процесса выпаривания. Результаты расчетов удовлетворяют экспериментальным данным с относительной погрешностью менее 5 %.

2. Разработана экспериментальная установка, обеспечивающая вакуумное выпаривание при пониженных температурах. Выполнены исследования дистилляции воды и выпаривания плодово-ягодных соков в вакууме.

3. Установлено, что шестикратное увеличение мощности нагрева от 2,2 до 13,2 кВт уменьшает время запаздывания процесса выпаривания в ~ 3 раза от 40 до 12 мин, время разгона в $\sim 2,5$ раза от 80 до 30 мин, повышает температуру выпаривания в $\sim 1,8$ раза от 32 до 59 °С. Обнаружены участки насыщения на зависимостях удельной скорости выпаривания от температуры $w(t)$. Определен оптимальный режим выпаривания, обеспечивающий максимальную удельную производительность по выпаренной влаге $w/N \approx 5\% \cdot (\text{кВт} \cdot \text{час})^{-1}$.

4. Предложены алгоритм управления и устройства автоматического пеноподавления и выпаривания плодово-ягодных соков в вакууме. Устройство, управления выпариванием отличается использованием пьезодатчика в качестве датчика начала конденсации и оптопары в качестве датчика уровня пены в испарителе.

5. Проведены испытания устройства автоматического управления выпариванием при удалении влаги из плодово-ягодных соков. Достигнуто повышение эффективности процесса выпаривания за счет перехода от ручного режима управления к автоматическому режиму. Оценка эффективности показала повышение качества обезвоженного сока, содержание витамина С в соке черной смородины выросло в 3,9 раза от 53 мг/100 г до 207 мг/100 г.

6. Разработана методика оценки параметров процесса выпаривания плодово-ягодных соков в вакууме на программно-техническом комплексе, использующая контролирование уровня пенообразования, температуры в испарителе, давления в системе и включающая сбор, обработку, представление и хранение данных.

7. Разработан программно-технический комплекс автоматизированной системы сбора и представления данных, реализующий методику оценки параметров процесса выпаривания.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Емельянов, К.А. Устройство автоматического выпаривания жидкого сельскохозяйственного сырья в вакууме [Текст] / Ю.К. Сотников, К.А. Емельянов //

Автоматизация и современные технологии, 2012. – № 3. – С. 13-16 (Личное участие 50%).

2. **Емельянов, К.А.** Устройство автоматического пеноподавления при выпаривании жидкого сельскохозяйственного сырья в вакууме [Текст] / Ю.К. Сотников, К.А. Емельянов, А.С. Тимаков // Автоматизация и современные технологии, 2011. – № 1. – С. 3-6 (Личное участие 30%).

3. **Емельянов, К.А.** Вакуумный дистиллятор [Текст] / А.А. Емельянов, В.В. Долженков, К.А. Емельянов // Приборы и техника эксперимента, 2008. – № 5. – С. 146-149 (Личное участие 30%).

Прочие публикации

4. **Emelyanov, K.A.** A novel method of fruit raw material reprocessing [Текст] / А.А. Emelyanov, К.А. Emelyanov // Engineering (USA), 2010. – V. 2. – № 12. – P. 962-968. (Личное участие 50%).

5. **Емельянов, К.А.** Параметры процесса сушки сока черной смородины [Текст] / А.А. Емельянов, А.Г. Золотарёв, В.В. Долженков, К.А. Емельянов // Хранение и переработка сельхозсырья, Москва, 2010. – № 11. – С. 10-11. (Личное участие 25%).

6. **Емельянов, К.А.** Установка для концентрирования и сушки жидких пищевых продуктов в вакууме [Текст] / А.А. Емельянов, В.В. Долженков, К.А. Емельянов // Известия вузов. Пищевая технология, Москва, 2009. – № 4. – С. 84-87. (Личное участие 30%).

7. **Емельянов, К.А.** Подавление пены при выпаривании жидкого сельскохозяйственного сырья в вакууме [Текст] / А.А. Емельянов, К.А. Емельянов // Пиво и напитки, Москва, 2009. – № 1. – С. 38-39. (Личное участие 50%).

8. **Емельянов, К.А.** Исследование режимов выпаривания влаги в вакууме [Текст] / А.А. Емельянов, В.В. Долженков, А.Г. Золотарёв, К.А. Емельянов // Известия ОрелГТУ “Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии”, Орел, 2007. – № 1/265(531). – С. 94-97. (Личное участие 25%).

9. **Емельянов, К.А.** Автоматизация сбора и представление данных о температуре выпаривания жидкого сельскохозяйственного сырья в вакууме [Текст] / К.А. Емельянов // Сборник статей одиннадцатой международной научно-практической конференции "Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности", Санкт-Петербург, 2011. – т. 3. – С. 255–256. (Личное участие 100%).

10. **Емельянов, К.А.** Разработка устройства автоматического сбора и программы обработки данных процесса выпаривания плодово-ягодных соков в вакууме [Текст] / К.А. Емельянов // Материалы международной заочной научно-практической конференции "Наука и техника в современном мире", Новосибирск, 2011. – С. 86-90. (Личное участие 100%).

11. **Патент № 2455596 RU, С1.** Устройство для удаления влаги в вакууме [Текст] / А.А. Емельянов, К.А. Емельянов, Ю.К. Сотников; заявитель и патентообладатель ОрелГТУ. – № 2010146670/06; заявл. 16.11.10; опубл. 10.07.12, Бюл. № 19. – 8 с.: ил. (Личное участие 30%).

12. **Патент № 2432537 RU, С1.** Устройство для удаления влаги в вакууме [Текст] / А.А. Емельянов, К.А. Емельянов, Ю.К. Сотников, А.С. Тимаков; заявитель

и патентообладатель ОрелГТУ. – № 2010112173; заявл. 29.03.10; опубл. 27.10.11, Бюл. № 30. – 7 с.: ил. (Личное участие 25%).

13. **Патент № 2367863 RU, C1.** Способ удаления влаги в вакууме [Текст] / А.А. Емельянов, К.А. Емельянов; заявитель и патентообладатель ОрелГТУ. – № 2008132231/06; заявл. 04.08.08; опубл. 20.09.09, Бюл. № 26. – 5 с.: ил. (Личное участие 50%).

14. **Патент № 2328170 RU, C1.** Способ удаления влаги в вакууме [Текст] / А.А. Емельянов, К.А. Емельянов, В.В. Долженков, А.Г. Золотарев; заявитель и патентообладатель ОрелГТУ. – № 2007105775; заявл. 15.02.07; опубл. 10.07.08, Бюл. № 19. – 3 с.: ил. (Личное участие 25%).

15. **Патент № 2327092 RU, C1.** Устройство для удаления влаги в вакууме [Текст] / А.А. Емельянов, К.А. Емельянов, В.В. Долженков, А.Г. Золотарев; заявитель и патентообладатель ОрелГТУ. – № 2006140581; заявл. 16.11.06; опубл. 16.11.06, Бюл. № 17. – 4 с.: ил. (Личное участие 25%).

16. **Патент № 2316701 RU, C1.** Устройство для удаления влаги в вакууме [Текст] / А.А. Емельянов, К.А. Емельянов, А.Г. Золотарев; заявитель и патентообладатель ОрелГТУ. – № 2006122340; заявл. 22.06.06; опубл. 10.02.08, Бюл. № 4. – 3 с.: ил. (Личное участие 30%).

17. **Патент № 2276314 RU, C1.** Устройство для удаления влаги в вакууме [Текст] / А.А. Емельянов, К.А. Емельянов, Я.А. Морозов; заявитель и патентообладатель ОрелГТУ. – № 2004136365; заявл. 14.12.04; опубл. 10.05.06, Бюл. № 13. – 4 с.: ил. (Личное участие 30%).

18. **Емельянов, К.А.** Автоматизированная система сбора и представления данных процесса низкотемпературного удаления влаги в вакууме. [Текст] / К.А. Емельянов – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011615036 Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам от 28.06.2011. (Личное участие 100%).

19. **Емельянов, К.А.** Автоматизированная система сбора и представления данных процесса низкотемпературного удаления влаги в вакууме. [Текст] / К.А. Емельянов – Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2011620474 Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам от 28.06.2011. (Личное участие 100%).

ЛР ИД № 00670 от 05.01.2000 г.

Подписано к печати «25» сентября 2012 г.

Усл. печ. л. 1,5 Тираж 100 экз.

Заказ № 155