

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 681.518.3

## ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПОДГОТОВКИ СУШИЛЬНОГО АГЕНТА С ЗАДАНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ

А.В. КАЙЧЕНОВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук, В.В. ЕРЕЩЕНКО<sup>1</sup>, ст. препод.,  
В.В. ЯЦЕНКО<sup>1</sup>, канд. техн. наук, И.Г. БЛАГОВЕЩЕНСКИЙ<sup>2</sup>, д-р техн. наук

<sup>1</sup>Мурманский государственный технический университет,  
183010, Мурманск, Спортивная ул., 13, e-mail: kaychenovav@mstu.edu.ru

<sup>2</sup>Московский государственный университет пищевых производств,  
125080, Москва, Волоколамское шоссе, 11, e-mail: igblagov@mgupp.ru

© Кайченов А.В., Ерещенко В.В.,  
Яценко В.В., Благовещенский И.Г., 2023

Рассмотрен программно-аппаратный комплекс для автоматического управления процессом подготовки сушильного агента с заданными параметрами температуры и влажности. Аппаратная часть включает одноплатный компьютер, датчики температуры и влажности, платы управления холодильной машиной и заслонками, платы связи. Программная составляющая комплекса содержит модули опроса датчиков, управления холодильной машиной, расчета степени открытия заслонки, управления обменом данными. Представлено математическое описание процессов нагрева, охлаждения, осушения, увлажнения и смешивания потоков воздуха, которое послужило основой для модуля визуализации в виде интерактивной I-d-диаграммы, позволяющей рассчитывать параметры процессов увлажнения, нагрева, охлаждения и смешения сушильного агента. Приведены результаты экспериментов по адиабатическому увлажнению и нагреву одной секции малогабаритной сушильной установки УПОР-М.

*Ключевые слова:* программно-аппаратный комплекс, автоматическое управление, сушильный агент, математическое описание, интерактивная I-d-диаграмма.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2023-1-41-53**

### ВВЕДЕНИЕ

Продовольственная безопасность страны является одним из самых важных элементов национальной безопасности. Для ее достижения необходимо иметь стабильное внутреннее производство, создать резервы (запасы) продуктов. При выпуске новой пищевой продукции важной составляющей выступает не только разработка новых технологий, но и соблюдение правил транспортировки и хранения, поэтому одна из задач пищевой промышленности – сохранение продуктов без потерь.

В документе «Стратегия развития рыбохозяйственного комплекса Российской Федерации на период до 2030 года» предполагается, что увеличение эффективности рыбоперерабатывающих мощностей может быть достигнуто при операционной эффективности и качественной переработке водных биологических ресурсов,

получении добавленной стоимости. Возрастанию операционной действенности будет способствовать рост ряда показателей, в том числе энергоэффективности, и сокращение ручного труда за счет автоматизации процессов [1].

Способы переработки продуктов включают в себя отдельные технологические процессы, которые зависят от многих параметров, в частности типа и качества сырья, вида продукции, готовности к потреблению и др.

В производстве копченой и сушеной пищевой продукции (обезвоживание, сушка) удаление влаги, как правило, является обязательной операцией; эта операция представляет собой достаточно энергоемкий этап. Разработка режимов обезвоживания (копчения) зачастую сопряжена с изменением параметров воздуха, поступающего в установку из производственного цеха. Изменение параметров часто зависит от температуры и влажности окружающей среды, их колебаний, варьирования цеховых условий при обработке сырья. Все эти факторы обуславливают подбор параметров режимов обезвоживания.

Вопросам математического моделирования систем управления кондиционированием воздуха, прогнозированию качества обезвоживания сырья исследователи уделяют значительное внимание [2–8]. Разработка технических средств автоматизации процессов обезвоживания сырья является актуальной задачей. Решение этой задачи связано с системами подготовки сушильного агента, обладающими требуемыми параметрами температуры и влажности.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования является программно-аппаратный комплекс для малогабаритной сушильной установки поиска оптимальных технологических режимов УПОР-М, позволяющий разработать особый режим обезвоживания для конкретного продукта вне зависимости от климатического региона и времени года [9, 10].

Программно-аппаратный комплекс УПОР-М, в основе которого лежит переменный способ сушки, состоит из сушильной камеры, холодильной машины и воздухоподогревающей системы, а также программно-реализованной системы автоматического управления на базе одноплатного компьютера.

При осуществлении переменного способа весь процесс разбивается на несколько частей, каждая часть – на интервалы, которые состоят из периода сушки и периода релаксации. Длительность периода режима зависит от свойств продукта, температуры внутри продукта и заданных параметров для этого режима [9, 10].

Установка работает в двух режимах:

обезвоживания, при котором обеспечиваются высокая температура (до 30 °С) и низкая влажность;

релаксации, при котором обеспечиваются низкая температура (15...18 °С) и высокая влажность.

В режиме обезвоживания (рис. 1а) центробежный вентилятор подает сушильный агент из камеры сушки на испаритель, конденсируя содержащуюся в нем влагу, которая стекает в накопительную емкость, затем осушенный холодный воздух разбивается на два потока. Один поток, проходя через регулирующую системой управления заслонку, подается на часть конденсатора холодильной машины, где нагревается до необходимой температуры. При этом вентилятор охлаждения основной части конденсатора уменьшает расход охлаждающего воздуха из окружающей среды. Нагретый сухой воздух смешивается с холодным сухим воздухом. Полученный в результате этого сухой теплый воздух проходит через ТЭН донагрева и возвращается в камеру сушки [9, 10].

В режиме релаксации (рис. 1б) система управления обеспечивает поддержание заданного тепловлажностного режима путем регулирования пуска и останова компрессора холодильной машины и работы ультразвукового парогенератора. При работе компрессора центробежный вентилятор подает сушильный агент из камеры сушки на испаритель. Влага, содержащаяся в воздухе, стекает в накопительную емкость. Осушенный холодный воздух возвращается в камеру сушки. Заслонка подачи холодного сухого воздуха в контуре нагрева на этом этапе полностью закрыта, а вентилятор охлаждения основной части конденсатора имеет максимальный расход охлаждающего воздуха из окружающей среды. При останове компрессора центробежный вентилятор продолжает работу и обеспечивает рециркуляцию сушильного агента. Включение в работу ультразвукового парогенератора повышает влагосодержание сушильного агента. Увлажненный сушильный агент проходит через ТЭН донагрева и возвращается в камеру сушки.

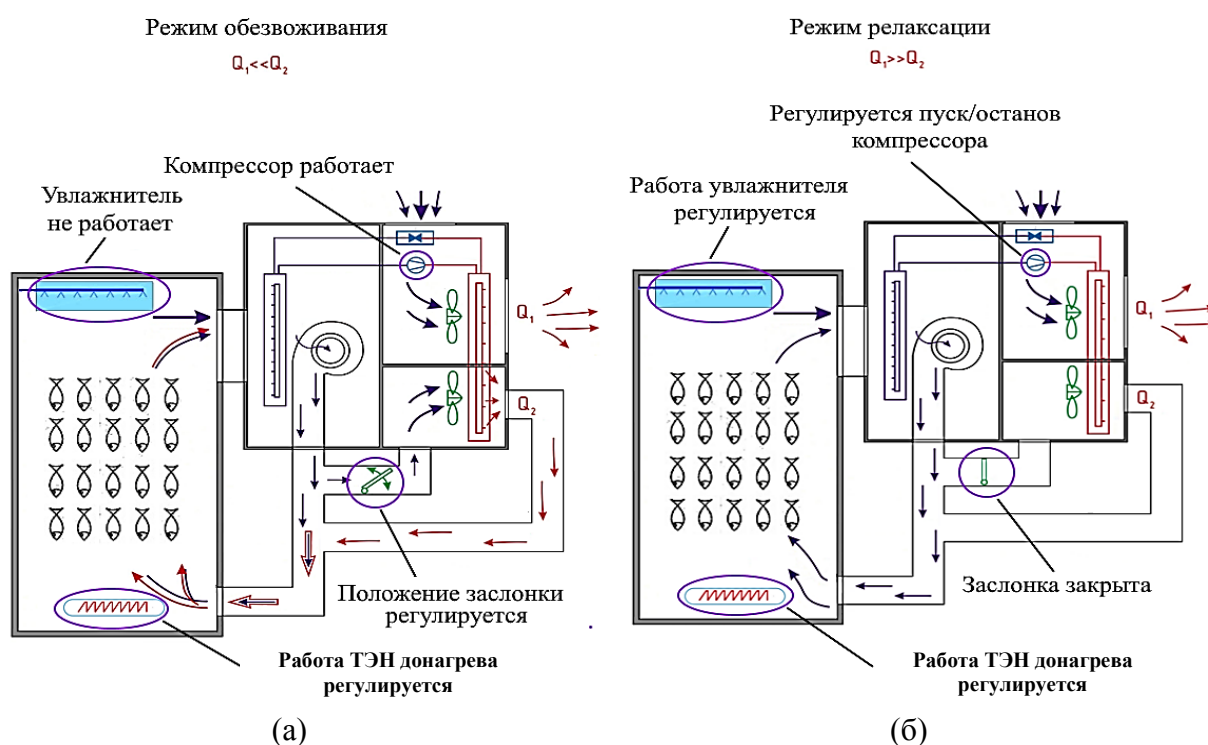


Рис. 1. Режимы работы программно-аппаратного комплекса: в режиме осушения (а); охлаждения (б)

Управление температурой, влажностью и скоростью потока осуществляется в соответствии с заранее заданной программой эксперимента. Технологические данные (по температуре, влажности, скорости потока, потреблению энергии) регистрируются и архивируются для последующего анализа.

Процесс получения сушильного агента с заданной температурой и влажностью представляет собой по сути тепловлажностную обработку воздуха. Было составлено математическое описание основных операций обработки: нагрева, охлаждения, осушения, увлажнения и смешивания двух потоков.

Для определения параметров воздуха в результате тепловлажностной обработки воздуха используют I-d-диаграмму, разработанную российским ученым Леонидом Константиновичем Рамзиным, и ее аналоги: диаграмму Молье, разработанную немецким теплотехником Рихардом Молье, или диаграмму Кэрриера (также называемую психрометрической диаграммой, диаграммой Гросвенора) [7, 8, 11].

I-d-диаграмма – диаграмма в косоугольной системе координат, на которую нанесены линии температуры по сухому  $t$  и влажному  $t_m$  термометру, энтальпии  $i$ , влагосодержание  $d$  и дуги относительной влажности воздуха  $\varphi$ , %. Горизонтальной осью на этой диаграмме является влагосодержание  $d$ , вертикальной – температура по сухому термометру  $t$ , а под наклоном к горизонтальной оси – энтальпия  $i$ . Осью переходящей от вертикального направления к горизонтальному является относительная влажность воздуха  $\varphi$ , %. I-d-диаграмма построена для нормального атмосферного давления. Она связывает все основные параметры влажного воздуха и позволяет определить состояние воздуха по известным двум показателям: температуре и относительной влажности; относительной влажности и энтальпии; температуре и влагосодержанию и т. д.

По I-d-диаграмме можно найти восемь параметров влажного воздуха: температуру по сухому и влажному термометру, точку росы, давление воздуха, парциальное давление водяного пара, влагосодержание, относительную влажность, энтальпию.

Температура по сухому термометру представляет собой температуру влажного воздуха, измеренного с помощью термометра, свободно контактирующего с воздухом.

Температура по мокрому термометру показывает температуру, которую достигнет ненасыщенный влажный воздух в результате адиабатного тепло- и массообмена с водой, точка росы – температуру, до которой влажный воздух должен быть охлажден, чтобы стать насыщенным водяным паром.

Давление воздуха демонстрирует барометрическое давление влажного воздуха и определяется высотой над уровнем моря. Величина барометрического давления равна сумме парциального давления сухого воздуха и парциального давления водяного пара.

Парциальное давление водяного пара показывает, какое давление имел бы водяной пар, находящийся во влажном воздухе, если бы он один занимал объем, равный объему этого влажного воздуха, при той же температуре.

Парциальное давление сухого воздуха зависит от температуры воздуха, а парциальное давление водяного пара – от температуры воздуха и содержания влаги в нем. Парциальное давление водяного пара может быть найдено по формулам:

$$p_n = 611,21 \cdot e^{\left(18,678 - \frac{t}{234,5}\right) \frac{t}{257,14+t}} \text{ при } t \geq 0;$$

$$p_n = 611,15 \cdot e^{\left(23,036 - \frac{t}{333,7}\right) \frac{t}{279,82+t}} \text{ при } t < 0,$$

где  $p_n$  – максимальное значение абсолютной влажности, г/м<sup>3</sup>.

Абсолютная влажность – отношение массы водяного пара  $m_{\text{вод. пара}}$  во влажном воздухе к массе сухого воздуха в некотором объеме воздуха  $V_{\text{воздуха}}$ :

$$p = m_{\text{вод. пара}} / V_{\text{воздуха}}.$$

Относительная влажность показывает соотношение количества влаги, которое находится в воздухе, и ее максимально возможного количества. Определяется эта влажность по формуле

$$\varphi = (p / p_n) \cdot 100 \%,$$

где  $p$  – текущее значение абсолютной влажности, г/м<sup>3</sup>.

Влагосодержание влажного воздуха – это отношение массы пара  $M_n$  к массе (объему) сухого воздуха  $M_{c.в}$ :

$$d = M_n / M_{c.в}.$$

Удельная энтальпия влажного воздуха – параметр, показывающий, какое количество теплоты, отнесенное к 1 кг сухого воздуха, содержится во влажном воздухе при заданной температуре и давлении. Формула определения энтальпии  $i$  по температуре  $t$  и влагосодержанию  $d$ :

$$i = (1,01 + 0,001\ 97 \cdot d) \cdot t + 2,493 \cdot d.$$

Нагрев воздуха при прохождении его через различные нагревательные устройства из состояния с параметрами  $t_A$  и  $d_A$  до состояния с параметрами  $t_B$  и  $d_B$  происходит без изменения его влагосодержания, то есть  $d_A = d_B = \text{const}$  (рис. 2), и с уменьшением относительной влажности  $\varphi$ .

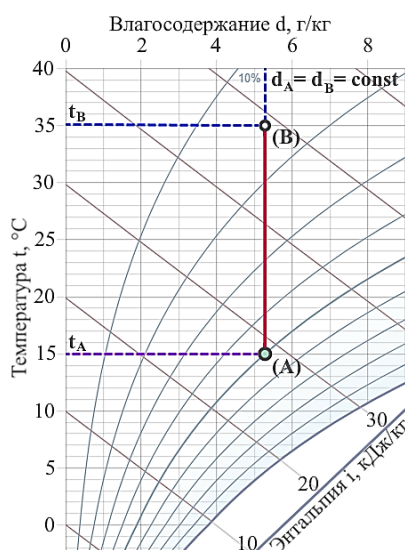


Рис. 2. Процесс нагрева на I-d-диаграмме влажного воздуха

Процесс идеального охлаждения воздуха при прохождении его через различные охладительные устройства из состояния с параметрами  $t_A$  и  $d_A$  до состояния с параметрами  $t_B$  и  $d_B$  происходит также без изменения его влагосодержания (также  $d_A = d_B = \text{const}$ ) (рис. 3а) и с увеличением относительной влажности  $\varphi$ .

Однако после того как воздух оказывается насыщенным (точка  $B'$ , где  $\varphi = 100\%$ ), дальнейшее охлаждение сопровождается конденсацией пара и уменьшением влагосодержания (рис. 3б) на величину

$$\Delta d = d_A - d_B, \text{ г/кг}.$$

Процесс реального охлаждения воздуха сложный, то есть состоит из двух других (рис. 3в): охлаждения части воздуха, соприкасающегося с охлаждающей поверхностью до температуры этой поверхности, и смешивания потоков воздуха, а именно того, который соприкоснулся с охлаждающей поверхностью (точка  $B$ ), и того, который избежал контакта с этой поверхностью (точка  $A$ ). Результат смешивания (точка  $C$ ) зависит от конструктивных особенностей охладителя.

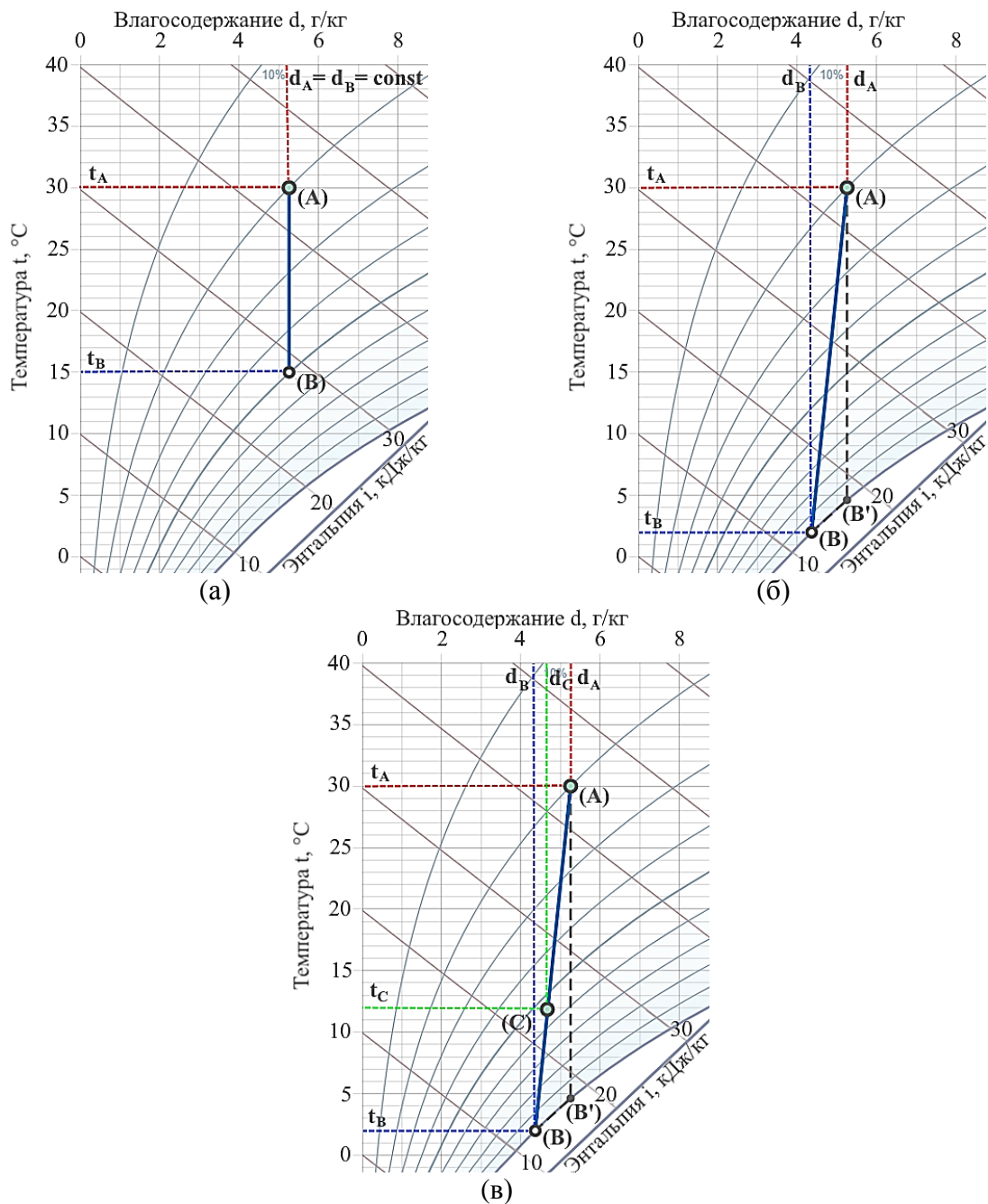


Рис. 3. Процесс охлаждения на I-d-диаграмме влажного воздуха:  
 идеальное охлаждение без изменения влагосодержания (а);  
 идеальное охлаждение с изменением влагосодержания (б);  
 реальное охлаждение (в)

Процесс смешения потоков воздуха с параметрами  $i_A, d_A, G_A$  и параметрами  $i_B, d_B, G_B$ , представляет собой прямую линию, соединяющую точки с этими параметрами (рис. 4). Точка С характеризует результат смешивания и находится на расстоянии, обратно пропорциональном массам смешиваемых частей воздуха. Количество смеси  $G_C$  определяют из уравнения материального баланса:

$$G_C = G_A + G_B.$$

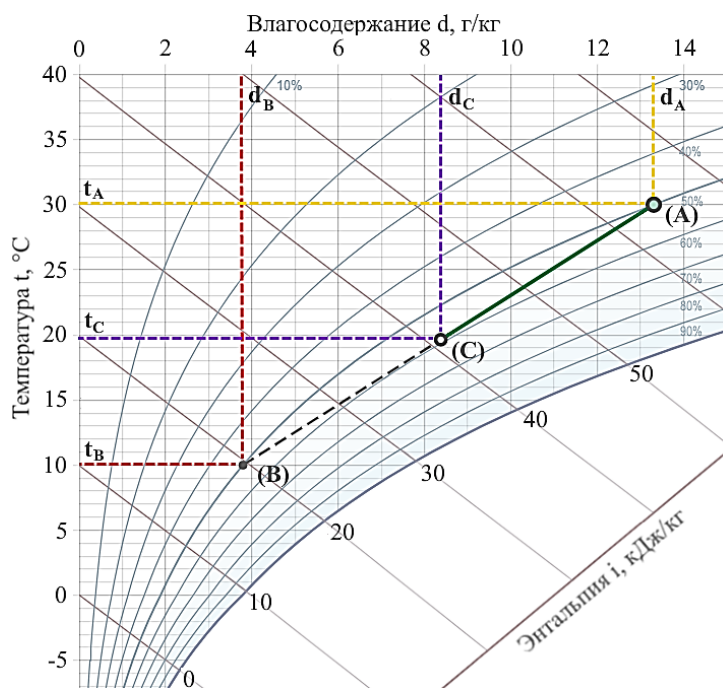


Рис. 4. Процесс смешения на I-d-диаграмме влажного воздуха без выпадения конденсата

Параметры смеси находим по уравнениям теплового и влажностного балансов:

$$G_A \cdot i_A + G_B \cdot i_B = G_C \cdot i_C;$$

$$G_A \cdot d_A + G_B \cdot d_B = G_C \cdot d_C;$$

$$i_C = \frac{G_A \cdot i_A + G_B \cdot i_B}{G_A + G_B};$$

$$d_C = \frac{d_A \cdot G_A + d_B \cdot G_B}{G_A + G_B};$$

где  $i_A$ ,  $i_B$  – энтальпии смешиваемых потоков воздуха, кДж/кг;  $G_A$ ,  $G_B$  – массы смешиваемых потоков воздуха, кг;  $d_A$ ,  $d_B$  – влагосодержания смешиваемых потоков, г/кг.

Поскольку направление линии процесса смешения известно, то достаточно выполнить расчет одного из параметров точки смеси ( $i_C$  или  $d_C$ ). Точка  $C$  делит отрезок  $A-B$  в отношении, обратном пропорциональном смешиваемым количествам. Положение точки  $C$  можно определить также из отношения отрезков линии смеси:

$$\frac{AC}{CB} = \frac{G_B}{G_A}.$$

В случае когда линия смеси пересекает область тумана (линия  $A_1-B_1$  на рис. 5), то смешение потоков воздуха происходит с выпадением конденсата. Принимают, что действительное положение точки смеси находится на линии насыщения  $\varphi = 100\%$  при той же энтальпии (точка  $C_1$ ).

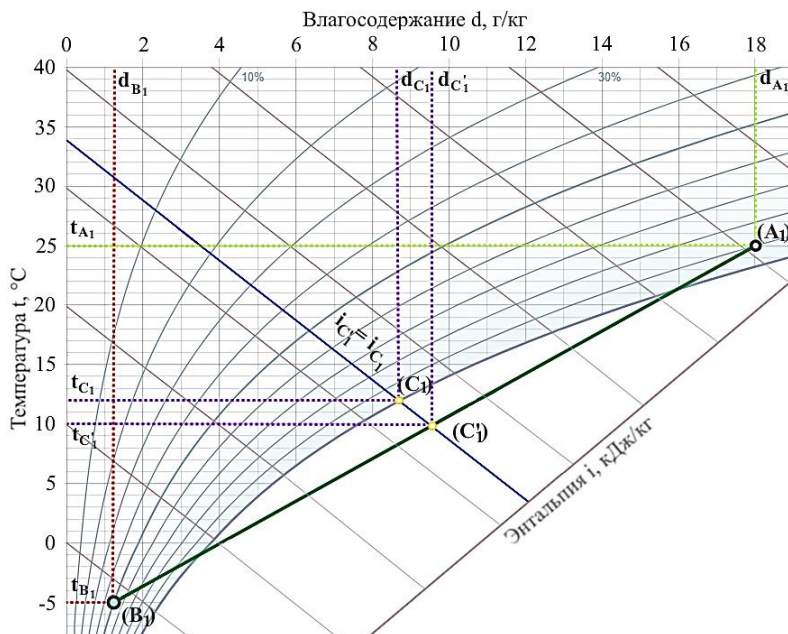


Рис. 5. Процесс смешения на I-d-диаграмме влажного воздуха с выпадением конденсата

Увлажнение воздуха подразделяется на два вида: адиабатическое и изотермическое. Процесс адиабатического увлажнения (отрезок A-B на рис. 6) идет по линии постоянной энтальпии и заканчивается в точке, соответствующей температуре мокрого термометра, изотермического увлажнения (отрезок A-C на рис. 6) – по линии постоянной температуры по сухому термометру и заканчивается в точке  $\varphi = 100\%$ .

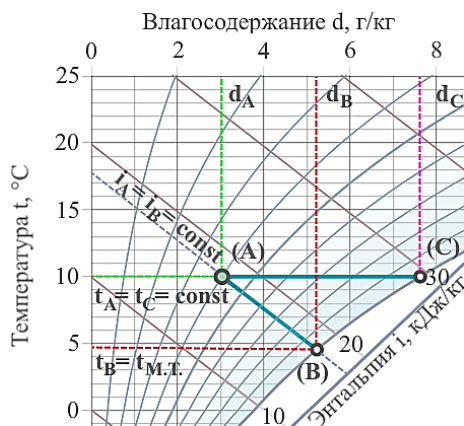


Рис. 6. Процесс увлажнения на I-d-диаграмме влажного воздуха

Математическое описание процессов нагрева, охлаждения, осушения, увлажнения и смешивания двух потоков послужило основой программно-аппаратного комплекса для автоматического управления процессом подготовки сушильного агента с заданными параметрами температуры и влажности.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Программная часть программно-аппаратного комплекса реализована в виде приложения и написана на языке Object Pascal в среде разработки Lazarus. Программная часть состоит из нескольких модулей:

- опроса датчиков температуры и влажности;



включения/выключения холодильной машины;  
 обмена данными между аппаратными, составляющими системы по протоколу ModbusRTU через интерфейс RS-485/RS-232;  
 модуль расчета и визуализации тепловлажностной обработки сушильного агента.

Аппаратная часть программно-аппаратного комплекса включает в себя одноплатный компьютер, датчики температуры и влажности, платы управления холодильной машиной и заслонками, платы связи.

Модуль расчета и визуализации тепловлажностной обработки сушильного агента в виде интерактивной I-d-диаграммы позволяет рассчитывать и визуализировать такие операции, как увлажнение, нагрев, охлаждение и смешение, используя теоретические модели процессов, а также выдавать управляющие воздействия исполнительным механизмам системы управления. Окно задания типа обработки и параметров влажного воздуха интерактивной I-d-диаграммы представлено на рис. 7.

Для проверки правильности расчетов теоретической модели проведены эксперименты по адиабатическому увлажнению (рис. 8а) и нагреву (рис. 8б) одной секции установки «УПОР-М».

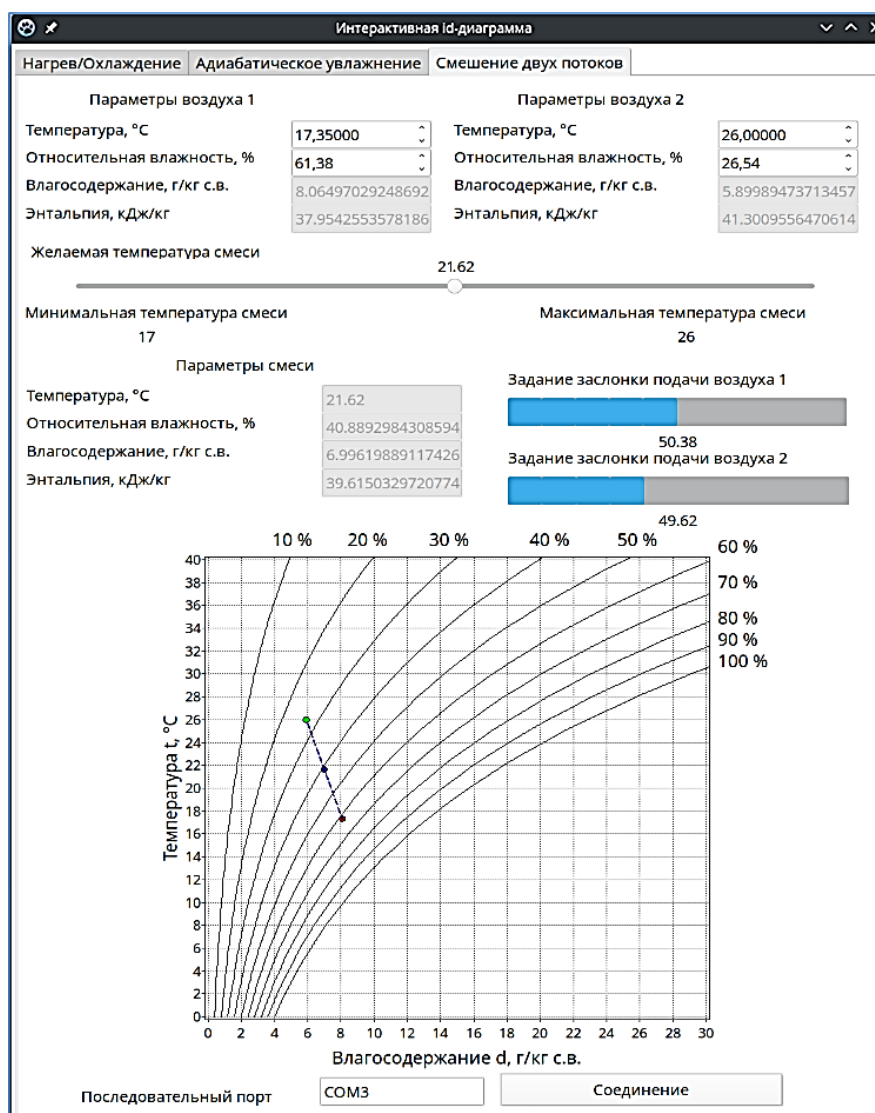


Рис. 7. Окно задания типа обработки и параметров влажного воздуха

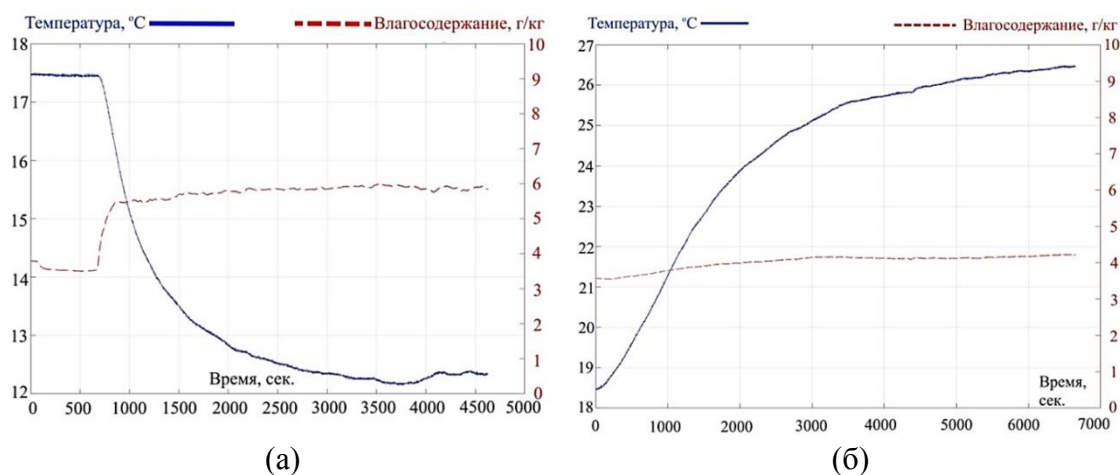


Рис. 8. Результаты эксперимента: по адиабатическому увлажнению (а); по нагреву (б)

Увлажнение с использованием ультразвуковых увлажнителей представляет собой адиабатический метод распыления воды. Для определения параметров воздушной смеси при изменении относительной влажности от начального  $\varphi$  до конечного  $\varphi$  необходимо задать параметры исходного состояния этой смеси, после чего можно изменять относительную влажность смеси и наблюдать ее состояние. I-d-диаграмма для адиабатического увлажнения при начальных параметрах воздуха (17,46 °С и 3,78 г/кг влагосодержания) и конечных (12,3 °С и 5,9 г/кг влагосодержания) представлена на рис. 9а. Красным цветом показан отрезок, соединяющий начальные и конечные параметры воздуха, желтым цветом выделены результаты эксперимента. Отклонение теоретически рассчитанных значений от экспериментальных по температуре не превышает 2 и 5 % по влагосодержанию.

При проведении эксперимента нагреватель был выключен, вытяжной вентилятор включен на 100 % производительности, при этом увлажнитель включен на 100 % производительности. Результаты эксперимента показали соответствие теоретического описания процесса адиабатического увлажнения, полученного с применением I-d-диаграммы (рис. 9а, см. рис. 8а).

Для определения параметров воздушной смеси после операции нагрева или охлаждения необходимо ввести текущие параметры смеси, после чего задать желаемую температуру. I-d-диаграмма для нагрева при начальных параметрах воздуха (18,42 °С и 3,78 г/кг влагосодержания) и конечных (26,5 °С и 4 г/кг влагосодержания) представлена на рис. 9б. Красным цветом показан отрезок, соединяющий начальные и конечные параметры воздуха, желтым цветом выделены результаты эксперимента. Отклонение теоретически рассчитанных значений от экспериментальных по температуре и влагосодержанию не превышает 1 %.

Проведены эксперименты по нагреву одной секции установки УПОР-М. При проведении эксперимента нагреватель был включен на 100 % мощности (250 Вт), вытяжной вентилятор – на 100 % производительности, а увлажнитель выключен. Результаты эксперимента представлены на рис. 9б. Результаты показали соответствие теоретического описания процесса нагрева, полученного с применением I-d-диаграммы (рис. 9б, см. рис. 8б). Экспериментальные данные сопоставлены с результатами расчета параметров воздуха в веб-приложениях [12, 13].

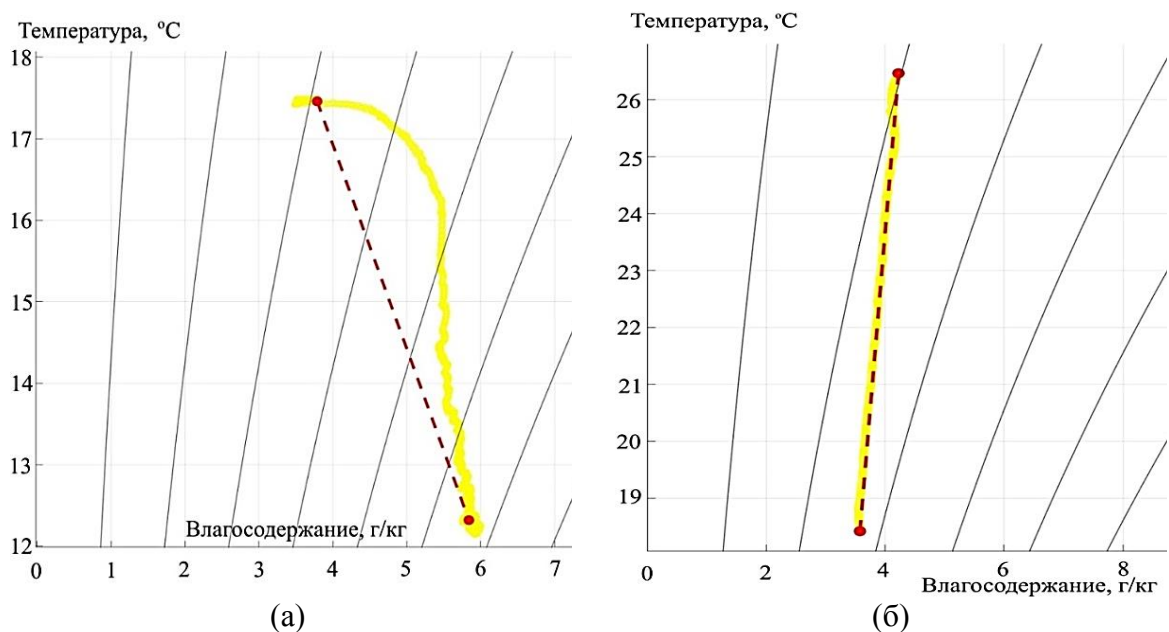


Рис. 9. Графический интерфейс модуля расчета параметров I-d-диаграммы для адиабатического увлажнения (а); процесса нагрева или охлаждения (б)

Программно-аппаратный комплекс позволяет осуществлять подготовку сушильного агента и при этом обеспечивать параметры температуры и влажности в соответствие с теоретическими моделями. Применение данного комплекса решает проблему изменения параметров воздуха, поступающего в установку из производственного цеха. Отметим, что разработка режимов обезвоживания сырья может быть проведена при постоянных (заданных) параметрах сушильного агента. Анализ результатов экспериментов по увлажнению и нагреву показывает более слабую зависимость влагосодержания от изменения температуры при нагреве, чем при относительной влажности. Использование данной закономерности позволяет управлять технологическими процессами обезвоживания сырья по влагосодержанию, что дает возможность избежать сильной взаимосвязанности контуров управления температуры и влажности.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований в программной части программно-аппаратного комплекса реализована теоретическая модель температурно-влажностных процессов. Проведены эксперименты по подтверждению результатов теоретической модели. Отклонение результатов модели от экспериментальных данных не превышает 5 %.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 22-26-20116, <https://rscf.ru/project/22-26-20116/>

### ЛИТЕРАТУРА

1. Стратегия развития рыбохозяйственного комплекса Российской Федерации на период до 2030 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/563879849> (дата обращения: 11.08.2022).

2. Журтаева З.Д., Власенко О.М. Моделирование системы управления тепловым режимом сушильной установки. *Сборник научных трудов кафедры автоматики и промышленной электроники*. М.: Московский государственный университет дизайна и технологии. 2016. С. 27–30.

3. Земцовский А.Е., Сидоров Г.И. Разработка концепции математической модели прогнозирования качества сушки пиломатериалов // *Системы. Методы. Технологии*. 2017. № 2 (34). С. 129–132.

4. Власенко О.М., Тимохин А.Н., Захаркина С.В., Масанов Д.В. Моделирование многосвязной системы управления кондиционированием воздуха в цехе производства полимерных материалов // *Дизайн и технологии*. 2020. № 77 (119). С. 68–77.

5. Сорокин А.С., Власенко О.М. Оптимизация работы системы Центрального кондиционера воздуха. *Сборник научных трудов кафедры автоматики и промышленной электроники*. М.: Московский государственный университет дизайна и технологии. 2016. С. 73–77.

6. Никитин А.А., Рябова Т.В., Поддубный Р.А., Василенок А.В. Сравнительный анализ графического и программно-ориентированного метода определения параметров влажного воздуха. *Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке: Материалы международной научно-технической конференции*. С-Пб.: Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики. 2015. С. 361–363.

7. Esfandiari Nia F., van Paassen D. A Simplified Graphical Model of Air Cooler Using Mollier Diagram and Implementation in a Design Tool // *Energy Sustainability*. 2008. V. 43208. P. 145–151.

8. Schmidt U. Decision support for greenhouse climate control using a computerised Mollier diagram // *International Workshop on Models for Plant Growth and Control of Product Quality in Horticultural Production 654*. 2003. P. 187–194.

9. Ионов Н.А., Ерещенко В.В. Разработка системы подготовки воздуха для установки поиска режимов сушки пищевого сырья. *Современные эколого-биологические и химические исследования, техника и технология производств: Материалы международной научно-практической конференции*. Мурманск: Мурманский государственный технический университет. 2017. С. 133–137.

10. Ерещенко В.В., Столянов А.В., Ершов М.А., Жук А.А. Разработка климатической камеры для малогабаритной сушильной установки УПОР-М. *Наука – производству: Материалы международной научно-практической конференции*. Мурманск: Мурманский государственный технический университет. 2016. С. 43–47.

11. Аверкин А.Г., Еремкин А.И., Ежов Е.Г., Аверкин Ю.А. Столетие I-d-диаграммы влажного воздуха: устройство, применение, модернизация // *Региональная архитектура и строительство*. 2017. № 4 (33). С. 166–172.

12. hx Diagram [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://tlk-energy.de/en/phase-diagrams/mollier-h-x/> (дата обращения: 11.08.2022).

13. Air Parameters Calculator [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://hvac-calculator.com/dew\\_point.php/](http://hvac-calculator.com/dew_point.php/) (дата обращения: 11.08.2022).

**Для цитирования:** Кайченев А.В., Ерещенко В.В., Яценко В.В., Благовещенский И.Г. Программно-аппаратный комплекс для автоматического управления процессом подготовки сушильного агента с заданными параметрами температуры и влажности // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 1 (17). С. 41–53.

# **HARDWARE AND SOFTWARE COMPLEX FOR AUTOMATIC CONTROL OF THE DRYING AGENT PREPARATION PROCESS WITH PRESET TEMPERATURE AND HUMIDITY PARAMETER**

A.V. KAYCHENOV<sup>1</sup>, Cand. Sc., V.V. ERESHCHENKO<sup>1</sup>, Sen. Lect.  
V.V. YATSENKO<sup>1</sup>, Cand. Sc., I.G. BLAGOVESHCHENSKY<sup>2</sup>, Dr. Sc.

<sup>1</sup>Murmansk State Technical University,  
13, Sportivnaya str., Murmansk, 183010, Russian Federation,  
e-mail: kaychenovav@mstu.edu.ru

<sup>2</sup>Moscow State University of Food Production,  
11, Volokolamsk hwy, Moscow, 125080, Russian Federation, e-mail: igblagov@mgupp.ru

The article describes a hardware and software complex for automatic control of the drying agent preparation process with specified temperature and humidity parameters. The hardware includes a single-board computer, temperature and humidity sensor, control boards for the refrigerator and flaps, communication boards. The software component of the complex includes modules for polling sensors, controlling the refrigeration machine, calculating the degree of flap opening, and managing data exchange. A mathematical description of the processes of heating, cooling, dehumidification, humidification and mixing of air flows is presented, which served as the basis for the visualization module in the form of an interactive I-d diagram that allows calculating the parameters of the processes of humidification, heating, cooling and mixing of the drying agent. The results of experiments on adiabatic humidification and heating of one section of a small-sized drying unit UPOR-M are presented.

*Keywords:* hardware and software complex, automatic control, drying agent, mathematical description, interactive I-d-diagram.

Поступила в редакцию/received: 21.07.2022; после рецензирования/revised: 05.09.2022;  
принята/accepted: 12.09.2022

УДК 004.021

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ПОКООРДИНАТНОГО СПУСКА ДЛЯ ПОИСКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ЦЕЛОЧИСЛЕННОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ**

Ю.Н. МАТВЕЕВ, д-р техн. наук, А.В. ИВАНОВ, аспирант

Тверской государственный технический университет,  
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: matveev4700@mail.ru

© Матвеев Ю.Н., Иванов А.В., 2023

Предложен алгоритм решения задачи целочисленного программирования способом, аналогичным методу покоординатного спуска. Альтернативный алгоритм позволяет избежать трудоемкого поиска точки с помощью симплекс-метода на каждой итерации. Приведены подробное описание алгоритма, демонстрация его работы на примере задачи оптимизации с двумя параметрами, текущие ограничения