

В. И. Бодров, М.В. Бодров

**Тепломассообмен в биологически активных системах
(теория сушки и хранения)**

Учебное пособие

Нижний Новгород

2013

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»

В.И Бодров, М.В. Бодров

**Тепломассообмен в биологически активных системах
(теория сушки и хранения)**

Утверждено редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия

Нижний Новгород
ННГАСУ
2013

ББК 38.762
УДК 631.365

Рецензенты:

Чекардовский М.Н. – д-р технических наук, профессор, зав. кафедрой теплогазоснабжения и вентиляции Тюменского государственного архитектурно-строительного университета

Юдинцев А.А. – канд. технических наук, доцент Нижегородской государственной сельскохозяйственной академии

Бодров, В.И. Тепломассообмен в биологически активных системах (теория сушки и хранения) [Текст]: учебное пособие / В.И. Бодров, М.В. Бодров. – Н. Новгород: ННГАСУ, 2013. – 145 с.

Изложены теоретические основы и практический опыт реализации расчетов динамики переноса теплоты и влаги в биологически активных системах при сушке продукции (максимальный влагосъем) и ее хранении (минимизация потерь влаги). Показаны преимущества расчетов нестационарных процессов тепломассопереноса на основе обобщенного термодинамического потенциала фаз (потенциала влажности). Приведенные методики расчетов обоснованы с технологической, теплофизической, энергетической и экологической точек зрения.

Учебное пособие предназначается для студентов старших курсов, магистрантов и аспирантов технических и сельскохозяйственных вузов, специализирующихся в области научных исследований, расчетов, проектирования и эксплуатации систем жизнеобеспечения энерго- и продуктосберегающих производственных сельскохозяйственных зданий и сооружений.

ISBN

© В.И. Бодров, М.В. Бодров
© ННГАСУ, 2013

Предисловие

Учебное пособие «Тепломассообмен в биологически активных системах (теория сушки и хранения)» предназначается для студентов старших курсов, магистрантов и аспирантов по направлению «Строительство» с целью углубленного изучения дисциплины «Нестационарный тепломассообмен». При изложении материала каждого из разделов учебного пособия авторами, наряду с описанием физической сущности и основных закономерностей динамики нестационарного тепломассопереноса, большое внимание уделено их практической значимости и инженерным методам расчетов процессов.

Диапазон применения методов расчетов динамики нестационарных процессов переноса теплоты и влаги в помещениях и тепловом контуре объектов строительства по каждой из специализаций обучения в магистратуре и аспирантуре чрезвычайно широк. В учебном пособии сделан акцент на теоретические особенности закономерностей тепломассопереноса в биологически активных системах при нестационарных внешних воздействиях. Например, научно обоснованы, разработаны и приведены методики расчетов минимизации влагоотдачи при хранении сочного растительного сырья и максимального влагосъема при сушке травы. Теория тепломассообмена в биологически активных средах, несмотря на кажущуюся специфичность процессов, наиболее полно и обобщенно раскрывает, научно и практически обосновывает пути совершенствования методов и технологий строительного производства. В зависимости от программы и специализации обучения магистрантов и аспирантов приводящиеся основополагающие термодинамические и тепломассообменные характеристики нестационарных процессов переноса теплоты и влаги при изучении возможно сократить или развить.

Приводимый в учебном пособии анализ взаимосвязанных процессов переноса теплоты и влаги в биологически активных средах оригинален и заканчивается новыми выводами и направлениями, которые до настоящего времени не в полной мере представлены в научной и технической литературе. Авторы осознанно основной упор делают на понятие определяющей взаимосвязи теплофизических, объемно-планировочных и биоэнергетических решений зданий, сооружений и технологий в строительстве и не приводят имеющиеся конкретные программные комплексы расчетов процессов нестационарного тепломассопереноса. Преобладающее внимание уделено описанию физических и математических моделей, вытекающих из фундаментальных представлений технической термодинамики и строительной теплофизики, что позволяет в расчетных методах отказаться от чрезмерного числа эмпирических коэффициентов, часто вводимых, исходя из интуитивных представлений о том или ином процессе.

Учебное пособие в первую очередь рассчитано на аспирантов и магистрантов-исследователей, занимающихся разработкой методов совершенствования технологий и конструктивных особенностей строительных и технологических объектов, а также бакалавров, специалистов и магистров, занимающихся конкретным проектированием и эксплуатацией зданий и сооружений. В связи с этим параллельно с изложением теоретических основ тепломассообмена даны практические приемы расчета с рекомендациями по применению. Такой подход способствует творческому усвоению материала, с одной стороны, и привитию основных навыков научно-исследовательской и проектной работы – с другой.

Большой интерес для упрощения и уточнения расчетов представляют научно обоснованные и введенные авторами новые положения и аналитические зависимости, позволяющие рассматривать тепло- и массообменные процессы в биологически активных системах на основе градиента единого потенциала состояния влаги (потенциала влажности).

В целом учебное пособие «Тепломассообмен в биологически активных системах (теория сушки и хранения)» является ценным научным и методическим трудом, позволяющим повысить уровень подготовки студентов, магистрантов и аспирантов по направлению «Строительство». Особенно ценно и необходимо оно для магистрантов, обучающихся по программам: «Системы обеспечения микроклимата зданий и сооружений»; «Теплогазоснабжение населенных мест и предприятий»; «Тепломассообменные процессы и установки»; «Проектирование зданий и сооружений».

Выход в свет данного учебного пособия будет способствовать развитию и совершенствованию непрерывности образовательного процесса в области строительства.

Член-корреспондент РААСН,
профессор В.Н. Бобылев

Введение

Обеспечение рационального теплового режима зданий в процессе проектирования и эксплуатации, оптимального использования энергии в системах отопления, холодоснабжения, вентиляции, кондиционирования воздуха, в теплогенерирующих установках, в системах теплоснабжения и в технологических процессах производства имеет первостепенное значение.

Тепломассообмен представляет собой теоретические основы теплотехнических дисциплин, играющих определяющую роль в подготовке научных работников и специалистов по направлению «Строительство», в том числе по теплогазоснабжению и вентиляции. Глубокое усвоение профилирующих дисциплин (отопление, вентиляция, кондиционирование воздуха, холодо- и теплоснабжение, теплогенерирующие установки, газоснабжение и др.) базируется на фундаменте теоретических (общетехнических) дисциплин, среди которых ведущее место принадлежит технической термодинамике, тепломассообмену, механике жидкости и газа. Успешное решение конкретных практических задач обусловлено умением специалистов осознано и творчески применять знания из области фундаментальных наук, иметь ясное представление о физической сущности явлений и процессов, использовать математические методы с целью получения ясных и обоснованных конечных результатов.

Несмотря на казалось бы конкретные указания относительно выбора движущих сил процессов тепло- и массопереноса, содержащиеся в выводах неравновесной термодинамики, не представляется возможности выявления этих сил в доступной для практического использования форме. Это объясняется невозможностью прямого вычисления изменения энергии систем в процессах переноса энергии и вещества. Однако, по меньшей мере в одном случае, а именно в условиях взаимосвязанного переноса теплоты и массы (влаги) между воздухом и биологически активным сырьем в

сверхгигроскопической и гигроскопической областях, такое вычисление непосредственно приводит к определению температурной зависимости интенсивности массопереноса. Следствием является модель, объединяющая оба вида переноса, а с учетом определения через гидродинамические характеристики сред обобщенного эмпирического коэффициента, и перенос количества вещества.

Учебное пособие рассчитано: на студентов старших курсов, магистрантов, аспирантов и научных работников, занимающихся разработкой и конструированием пассивных и активных систем обеспечения параметров микроклимата гражданских, промышленных и сельскохозяйственных зданий и сооружений; на магистрантов, аспирантов и специалистов, конкретно проектирующих, эксплуатирующих и налаживающих характеризующиеся значительным разнообразием системы микроклимата.

Различают три вида теплообмена: *теплопроводность*, *конвекция*; *тепловое излучение*. Теплопроводностью называется явление переноса тепловой энергии путем непосредственного соприкосновения между частицами тела. Конвекция заключается в явлении переноса теплоты путем перемещения и перемешивания между собой частиц жидкости или газа. Тепловое излучение или лучеиспускание – явление переноса энергии, подобно свету, в виде электромагнитных волн. Условия и закономерности протекания элементарных явлений различны. В большинстве случаев один вид теплообмена сопровождается другим.

В природе и технике многие процессы теплообмена сред усложняются процессами массообмена, фазовыми переходами, химическими и биохимическими реакциями. Изложение общих основ теории тепломассообмена и основ современной теории тепломассопереноса в биологически активных системах и практических приложений последней в промышленности и в сельскохозяйственном производстве является главной задачей учебного пособия.

ГЛАВА 1. РАВНОВЕСНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПЕРЕНОСА В БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ СИСТЕМАХ

Характеристики насыпей сочного растительного сырья и травы как термодинамических систем

Термодинамическая система. Понятие «термодинамическая система» по отношению к насыпям хранящегося сочного растительного сырья (картофель, овощи, фрукты) и сохнувшей травы как биологическим объектам оказывается наиболее сложным и неоднозначным. Этот тезис убедительно доказывается хотя бы индивидуальностью и многообразием направлений и интенсивности процессов тепломассопереноса: необходимость минимизации влагоотдачи при хранении сочного растительного сырья; требования по максимальному влагосъему в процессе сушки скошенной травы при заготовке грубых кормов.

Любая биологическая структура представляет собой открытую термодинамическую систему, способную осуществлять тепло- и массообмен между своими частями и внешней средой. Для решения инженерных задач при определении режимов хранения, сушки или иной обработки биологически активной продукции достаточен макроскопический уровень анализа. На этом уровне имеют значения феноменологические законы, описывающие поведение продуктов в условиях воздействия внешней среды. Процессы, происходящие в самом продукте системы, учитываются постольку, поскольку они могут определять продолжительность той или иной стадии обработки.

В термодинамике широко используется и определяется функция состояния системы S . Для всех обратимых процессов $dS = dQ/T$, а для необратимых процессов $dS > dQ/T$. Эту функцию называют *энтропией*, а ее изменение определяют отношением элементарного количества теплоты к абсолютной температуре. Разность $dS - dQ/T = dQ'/T$ характеризует сте-

пень необратимости процесса. Если $dQ' = 0$, то процесс обратим и его можно изобразить в координатах $S - T$, при конечном значении dQ' процесс необратим. Некомпенсированная теплота dQ' возникает вследствие протекания необратимых процессов *внутри самой системы*, тогда как dQ относится к обмену энергией с внешней средой.

Поэтому энтропия системы может изменяться как за счет ее переноса через границу, отделяющую данную подсистему, так и за счет внутренних необратимых процессов:

$$dS = d_e S + d_i S, \quad (1.1)$$

где индекс e относится к перенесенной энергии, а i – к энтропии, возникающей в самой системе.

Для изолированной системы (не обменивающейся с внешней средой ни массой вещества, ни энергией) первое слагаемое в правой части уравнения (1.1) обращается в ноль. Следовательно, в такой системе энтропия может только возрастать со временем.

Биологически активная продукция (картофель, овощи, плоды, скошенная трава с влажностью выше кондиционной) обладает высокой степенью организации своей структуры по сравнению с остальными объектами неживой природы. В них сохраняются основные признаки жизнедеятельности, выражающиеся в процессах влагообмена, газообмена и выделения физиологической (биологической) теплоты. Поэтому даже не взаимодействующие с внешней средой (например, упакованные) продукты нельзя считать изолированными, а тем более закрытыми с точки зрения термодинамики системами. При хранении и сушке в биологически активных продуктах непрерывно протекают процессы деструкции, приводящие к потере первоначальной высокой организации и образованию более простых веществ. Количественным показателем необратимости изменений структуры продукта служит скорость возрастания энтропии в данной части системы.

Общие законы равновесия. Термодинамика рассматривает только такие состояния большой совокупности частиц, которые могут считаться равновесными. Это не исключает конкретного анализа необратимых процессов, поскольку могут рассматриваться и состояния, близкие к равновесным. Общее учение о потоках, силах и феноменологических законах, описывающих поведение неравновесных систем, получило название *термодинамики необратимых процессов*.

Основной величиной, используемой в термодинамике необратимых процессов для их количественной характеристики, является интенсивность приращения энтропии в системе в единицу времени. В биологически активной продукции она обусловлена, в основном, химическими и биохимическими реакциями и может быть представлена в виде:

$$dS / d\tau = (1/T) \sum A_p v_p, \quad (1.2)$$

где v_p – коэффициент скорости реакции; A_p – скорость данной реакции.

Величина $A_p = -\sum v_k \mu_k$ [28]. Стехиометрические коэффициенты реакции v_k и химического потенциала μ_k принимаются для каждого компонента «к». В частности, при $v_k = 1,0$ величина A_p равна разности химических потенциалов данного компонента в двух фазах: $A_p = \mu'_k - \mu''_k$. Эта разность химических потенциалов называется *термодинамической движущей силой переноса*.

Как видно из соотношения (1.2), состояние термодинамического равновесия, при котором $A_p = 0$ или $v_p = 0$, есть не что иное, как состояние заторможенного химического равновесия.

Если же значения v_p отличны от нуля, то скорость химической реакции будет пропорциональна термодинамической движущей силе переноса:

$$v_p = L_{ik} A_p, \quad (1.3)$$

где L_{ik} – коэффициент пропорциональности, характеризующий зависи-

мость данной i -ой реакции от любой другой реакции с индексом «к» и от любых других процессов (тепловых, диффузионных и т.п.), одновременно протекающих в системе.

При этом в силу принципа микроскопической обратимости коэффициенты двух связанных процессов удовлетворяют соотношениям взаимности $L_{ik} = L_{ki}$. Поэтому из (1.3) вытекает:

$$dv_i / dA_k = dv_k / dA_i. \quad (1.4)$$

В соответствии с положениями классической термодинамики уравнение (1.4) означает, что величина dv является полным дифференциалом, т.е. *система обладает потенциалом*. Всякое изменение подобной системы, сопровождающееся ростом в ней энтропии, рано или поздно приводит ее к состоянию термодинамического равновесия – происходит выравнивание потенциалов в различных точках системы.

Для открытой системы полное изменение энтропии во времени

$$dS / d\tau = d_e S / d\tau + d_i S / d\tau \quad (1.5)$$

может быть лишь положительным или равным нулю ($dS/d\tau \geq 0$). В частном случае, приращение энтропии в системе в единицу времени может компенсироваться переносом энтропии во внешнюю среду за то же самое время, так что полное изменение энтропии $dS/d\tau = 0$. Такое состояние системы называется *стационарным*.

Необходимость условия $d_e S/d\tau < 0$ для осуществления стационарного состояния показывает, что в этом состоянии система должна отводить во внешнюю среду больше энтропии, чем получать из среды. Это возможно только тогда, когда система обладает устойчивым уровнем свободной энергии, что присуще всем высокоорганизованным питательным веществам, включая сочное растительное сырье и сохнущую траву. Таким образом, именно стабильность свободной энергии лежит в основе постоянства

сохраняемости основных физико-механических и физиологических свойств биологически активных продуктов.

Стационарное состояние, как частный случай термодинамического равновесия, достигается при минимуме величины d_iS/dt . Однако в процессе эволюции системы, прежде чем она придет в состояние истинного равновесия, приращение энтропии составляет хотя и минимальное, но конечное значение. Компенсацией данного процесса служит рассеивание (деградация) свободной энергии, запасенной в системе. Применительно к сохранности биологически активной пищевой продукции и питательности сохнувшей травы эта компенсация проявляется в виде потери части их пищевой ценности (ухудшения качества) при хранении и сушке.

Когда система достигнет стационарного состояния ($d_iS/dt \rightarrow \min$), она реагирует на внешние воздействия таким образом, что возникающий поток стремится компенсировать это воздействие [63]. Таким образом, стационарное состояние обладает устойчивостью, и система, будучи выведена из него, опять приходит в это состояние.

В конечном итоге результаты исследований, например [9, 28, 63], показали, что в состоянии термодинамического равновесия все фазы данной гетерогенной системы обладают одинаковой температурой, одинаковым давлением и химические потенциалы каждой из фаз равны.

Формы и энергия связи влаги с биологическим сырьем. Клубни картофеля, белокочанная капуста, корнеплоды моркови и свеклы столовой, лук репчатый являются вегетативными органами двух- и трехлетних растений. Сено представляет собой конечный продукт выращивания, уборки и сушки травы. У сочной растительной продукции различают механические, запасующие и покровные ткани. Первые придают растению устойчивую форму, во вторых сосредоточены составляющие основную питательную ценность продукции вещества. Через покровные ткани (эпидермис и перидерма) происходит влаго- и газообмен между межклеточным воздушным

пространством и атмосферой. Испарение влаги более активно осуществляется через открытые устья и чечевички, расположенные на поверхности эпидермиса или перидермы.

Картофель и овощи в связи с высоким содержанием в них воды (более 75%) выделены в особую группу, названную сочным растительным сырьем. Трава по структуре относится к коллоидным капиллярно-пористым телам. Влажность свежескошенной травы любого ботанического состава также очень высокая (75...80%). Вода в биологически активных продуктах находится в двух видах – свободном и связанном. Из-за сложной структуры органических веществ растительных продуктов природу отдельных сил связи влаги в них (химическая, физико-химическая, физико-механическая [71]) точно установить не представляется возможным. Говоря о связанной в продуктах воде, имеют в виду химически и часть физико-химически связанной воды, удерживаемой наиболее прочно. Менее прочно удерживаемую физико-химически связанную воду (вода в порах и пустотах травы) и воду, связанную с продукцией только механически, относят к свободной [42, 61]. Основная часть воды в сочном растительном сырье и в свежескошенной траве находится в свободной форме и лишь 5...15% в связанном состоянии.

Суммарное проявление всех видов связи влаги при условии термодинамического равновесия описывают зависимостями влагосодержания w или влажности w от величины относительной влажности воздуха φ , которые называются *изотермами сорбции*, характеризующими интенсивность (скорость) поглощения влаги продукцией, и *изотермами десорбции* (сушки продукции). Эти кривые начинаются в точке при $\varphi = 0$, которая соответствует абсолютно сухому продукту, и заканчивается в точке при $\varphi = 100\%$, которая соответствует максимальному сорбционному влагосодержанию материала w_c . Для многих видов продуктов состояние максимального сорбционного влагосодержания не достигается по причине растворения

отдельных компонентов или из-за плесневения продукта вследствие длительного процесса установления равновесия. В таких случаях изотерма сорбции обрывается в точке при $\varphi < 100\%$, которая соответствует сохранению исходного качества продукта.

Изотерма сорбции в большинстве случаев имеет характерную форму S – образной кривой. В связи с невозможностью точного аналитического определения математической зависимости, описывающей гигрометрическое равновесное состояние влажного материала, изотермы сорбции определяются эмпирическим путем. Суммарное проявление всех видов связи влаги при условии термодинамического равновесия (изотермы сорбции (увлажнения) или десорбции (сушки)) для различных сортов травы, сена, а также некоторых других растительных и пищевых продуктов, приведены на рис. 1.1, 1.2, 1.3 и 1.4.

Находясь в сравнительно свободном состоянии, физико-химически связанная вода вступает в химическое взаимодействие с материалом стенок капилляров. Отдельные компоненты продуктов со временем переходят в состав раствора, который образуется в капиллярах. Концентрация и состав этого раствора изменяются в результате взаимодействия продукта с внешней средой, изменяются также и сорбционные свойства стенок капилляров, что служит одной из основных причин сорбционного гистерезиса, т.е. несовпадения хода кривых сорбции и десорбции влаги сочным растительным сырьем и сохнущей травой.

Большое содержание воды в разных состояниях в живых растениях вызывает высокую активность биохимических процессов, по мере уменьшения влагосодержания травы наблюдается их замедление и даже практически полное отсутствие в сухом сене.

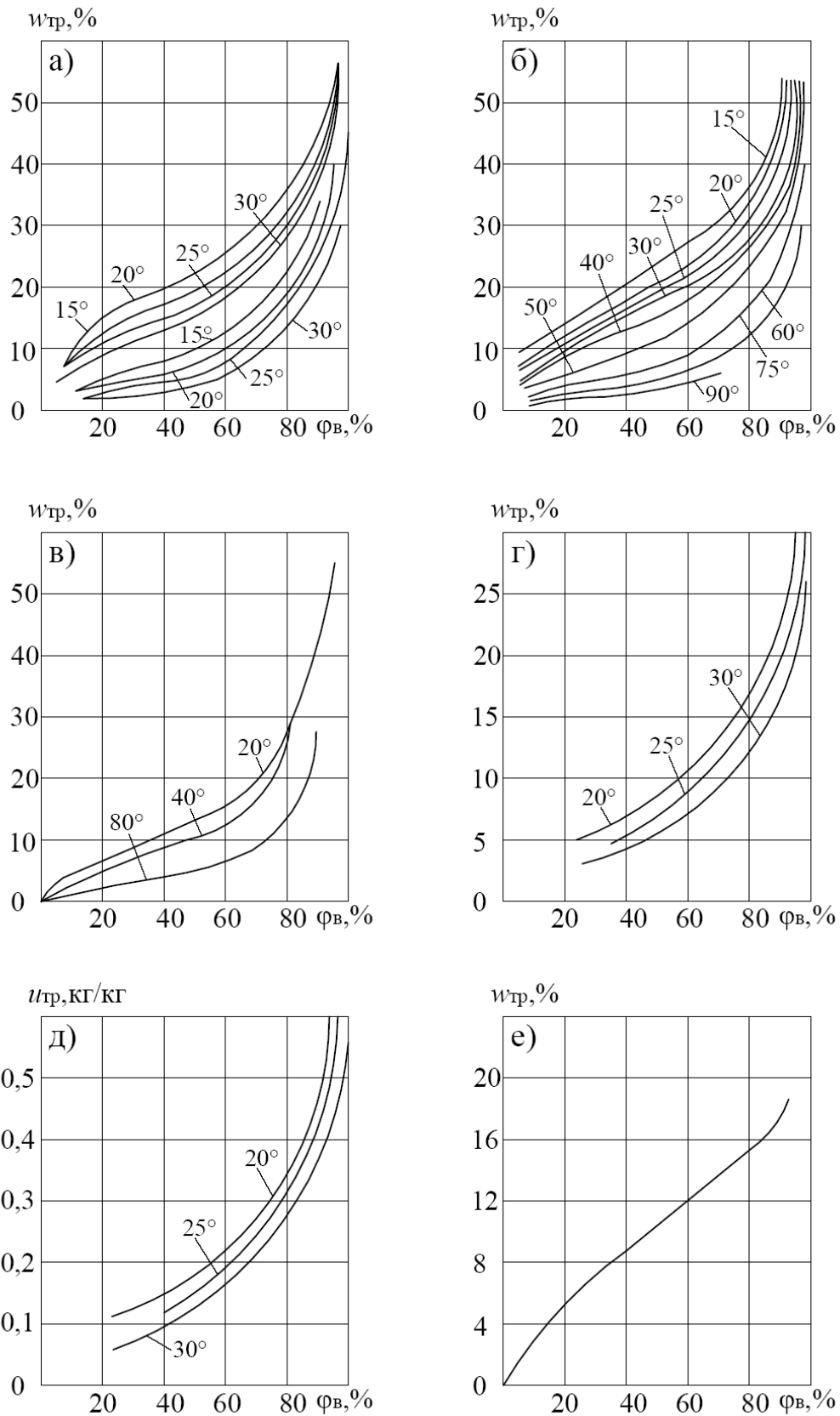


Рис. 1.1. Изотермы: *a* – сорбции и десорбции тимофеевки; *б* – десорбции сена (луговая трава) (J.K. Tunker); *в* – десорбции сена (луговая трава) (E. Potke); *г* – сорбции (люцерна) [24]; *д* – сорбции (луговая трава) (B. Winkler); *е* – сорбции (прессованная солома, $\rho = 250 \text{ кг/м}^3$) [54]

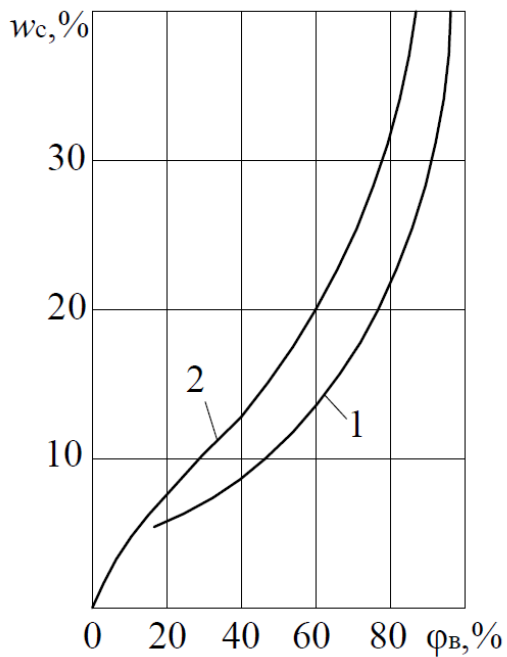


Рис. 1.2. Равновесная влажность:
1 – сена; 2 – табака, $t = 25\text{ }^\circ\text{C}$ [54]

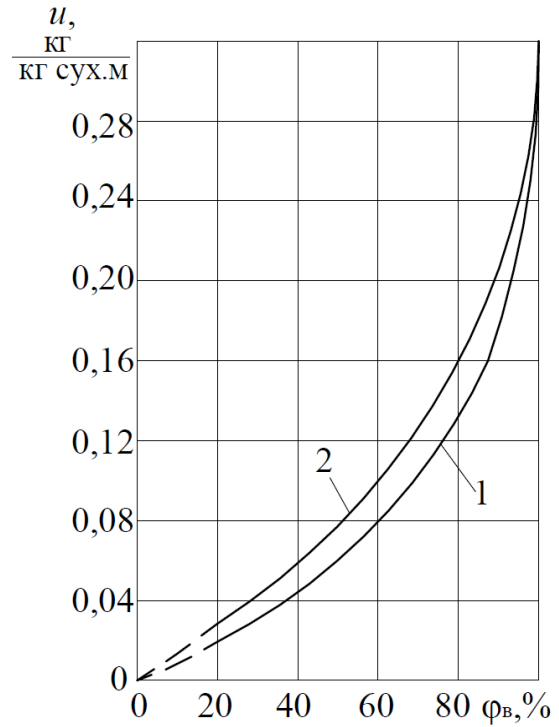


Рис. 1.3. Равновесная влажность льняной
тресты, $t = 40\text{ }^\circ\text{C}$: 1 – сорбция; 2 – десорбция
(И.М. Фальковский)

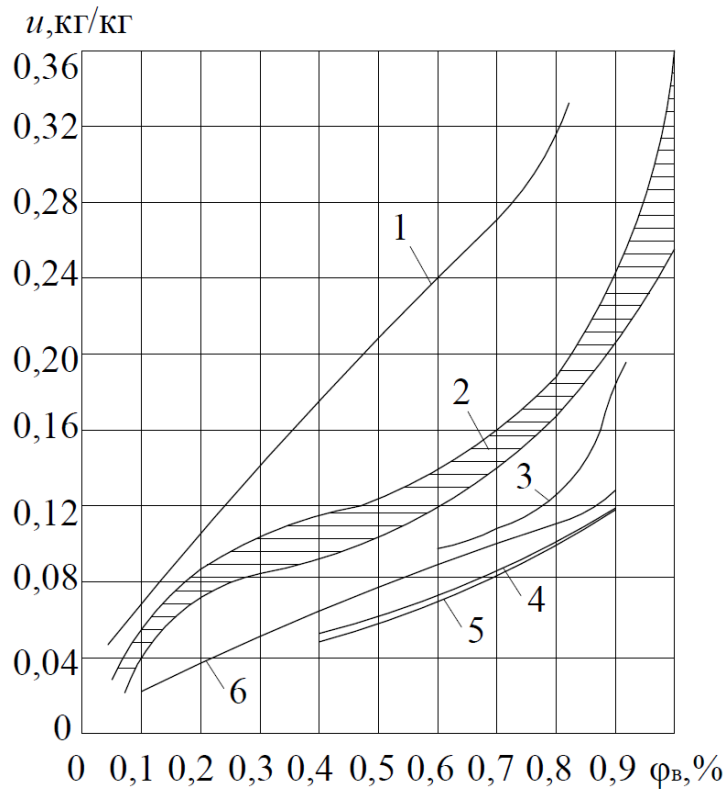
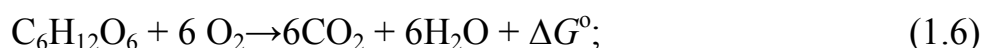


Рис. 1.4. Изотермы сорбции [60]: 1 – листья табака; 2 – злаки; 3 – соя;
4 – семена подсолнечника; 5 – конопля, лен; 6 – крахмал

Свободная энергия систем. Энергетическая основа жизнедеятельности биологически активной продукции заключается в дыхании. Различают анаэробный распад (гликолиз) и аэробный распад (окисление). Окислительные реакции (превращения), охватывающие все виды питательных веществ – углеводы, аминокислоты, жирные кислоты [28], являются основным источником энергии [9, 59, 79]:



или в грамм-молях $180 + 192 = 264 + 108$,

где $\Delta G^\circ = -2874$ кДж/моль – стандартное изменение энергии, представляющее собой изменение свободной энергии системы ΔG , которая может быть использована для выполнения работы при постоянной температуре и давлении: $\Delta G = \Delta u + p\Delta V - T\Delta S$; Δu – изменение внутренней энергии системы; $p\Delta V$ – работа, полученная или совершенная системой; $T\Delta S$ – переход теплоты из системы в окружающую среду.

Необратимый ход деструкции приводит к потере первоначальной высокой организованности продукта с выделением углекислого газа, воды и теплоты. По уравнению (1.6) можно получить, что при окислении 1 кг органических веществ выделяется 15960 кДж теплоты и 600 г воды, а выделению 1 мг CO_2 соответствует 12,5 кДж.

Отношение молярных количеств выделенного углекислого газа CO_2 и поглощенного кислорода O_2 называется *дыхательным коэффициентом* (ДК). Величина ДК зависит от температуры, физиологического состояния организмов и т.п. Изменения интенсивности дыхания при колебаниях температуры сочного растительного сырья находятся по формуле Гора [1]:

$$q_v = q_o \exp(Kt); \quad g_v = g_o \exp(Kt). \quad (1.7)$$

Значения удельной теплоты дыхания q_o , удельных выделений углекислого газа g_o , коэффициента K и температурного фактора скорости реакции Q_{10} при повышении температуры на 10°C приведены в табл. 1.1.

Т а б л и ц а 1.1

Значения интенсивности дыхания сочного растительного сырья

| Продукция | q_o , Вт/т | g_o , г CO ₂ /(т·ч) | K , 1/°С | Q_{10} |
|----------------------|--------------|----------------------------------|------------|----------|
| Картофель | 10,0 | 3,74 | 0,0617 | 1,85 |
| Капуста белокочанная | 14,5 | 15,40 | 0,0778 | 2,18 |
| Морковь | 13,5 | 3,74 | 0,1319 | 3,74 |
| Свекла столовая | 19,6 | 7,27 | 0,0717 | 2,05 |
| Лук репчатый | 11,1 | 4,12 | 0,0668 | 1,96 |

Стабильность температурного режима хранения способствует уменьшению интенсивности дыхания. Механические травмы, болезни, функциональные расстройства вызывают повышение интенсивности дыхания сочного растительного сырья в связи с необходимостью накопления энергии для синтеза защитных соединений. Экспериментально определено [18], что для среднереализуемых в практике хранения убранных машинным способом насыпей клубней картофеля в основной период хранения удельные явные тепловыделения $q_v = 17,6$ Вт/т, для насыпей белокочанной капусты $q_v = 9,7 \dots 11,7$ Вт/т, для насыпей моркови и свеклы столовой, соответственно, $q_v = 10,4$ Вт/т и $9,0$ Вт/т.

В срезанной траве продолжается физиологическая жизнь, сопровождающаяся аэробным дыханием. Отмирание клеток начинается, когда удалена основная масса свободной воды при $w_{тр} \leq 35 \dots 40\%$, а развитие микроорганизмов и плесневых грибков полностью прекращается при влажности травы $w_{тр} \approx 15\%$. Поэтому кондиционной влажностью сена считается $w_c = 15 \dots 18\%$ [53].

Значения влажности травы при температуре $20 \dots 30$ °С, до которой сушка идет с постоянной скоростью, находятся для различных видов трав в пределах $w_t = 32 \dots 40\%$ [24, 60].

В стоге с недосушенной травой может возникнуть самовозгорание. Дж. С. Уотсон и М.Дж. Нэш [77] приводят следующую цитату Плинея

(I столетие н.э.), говорящую о постоянной актуальности этого вопроса: «Когда трава скошена, ее следует сушить на солнце и ни в коем случае не стоговать до тех пор, пока она не будет совершенно сухой. Если это предписание не выполнить точно, то утром из стога будет виден своего вида пар, и вскоре, когда станет горячим, то часто воспламеняется и таким образом погибает». Первая биологическая стадия самовозгорания длится 8...12 дней. Температура за счет дыхания и деятельности бактерий поднимается до 42...49 °С. За следующие 5...7 дней успевают размножиться грибки, и температура увеличивается до 70...80 °С, при которой деятельность микроорганизмов практически заканчивается. Сено чернеет, обугливается, начинается вторая физико-химическая стадия процесса, обусловленная способностью обугленной массы поглощать кислород с выделением теплоты адсорбции. Разогрев идет скачкообразно, пока при температуре 280...320 °С не возникает воспламенение продуктов сухой перегонки и обугленной клетчатки.

Наличие испарительного эффекта охлаждения усложняет нахождение явной теплоты дыхания (в отечественной и зарубежной литературе имеются значения от 1935 до 2880 Вт/т). Проведенные в Нижегородском государственном архитектурно-строительном университете натурные исследования по определению зависимости явных тепловыделений от влажности сохнувшей травы осуществлялись в скирдах из бобовых и злаковых трав (методика и подробные результаты приведены в [18, 19]). Замеры темпа самосогревания сохнувшей травы $\Delta t/\Delta \tau$ проводились в ночное время при неработающих системах активной вентиляции. Различная влажность травы, поступающей в скирды после провяливания в поле, явилась причиной изменения локальных значений интенсивности биологических тепловыделений. Разницы в темпе самосогревания трав различных ботанических сортов: бобовых (люцерна) и злаковых (луговая трава) – выявить не удалось. Зависимость $\Delta t/\Delta \tau$ от влажности травы с учетом возможных областей

отклонений от среднеарифметических величин показана на рис. 1.5. Зависимость интенсивности явных биологических тепловыделений от влажности травы $q_{\text{тр}} = f(w_{\text{тр}})$ представлена на рис. 1.6.

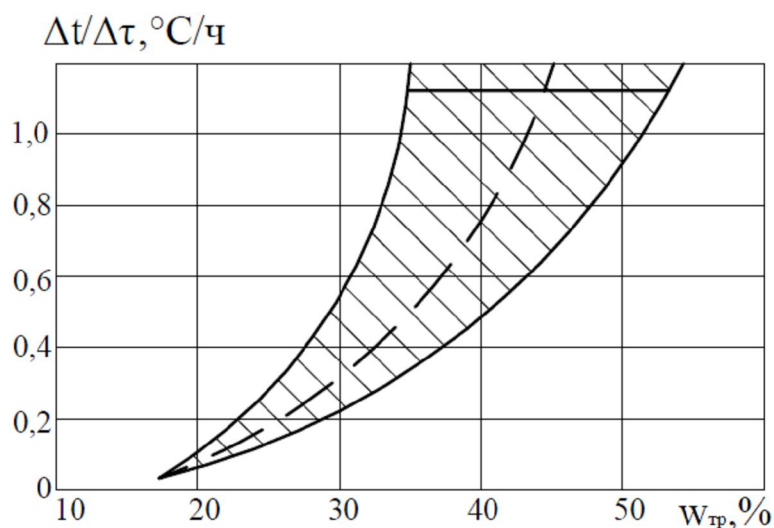


Рис. 1.5. Зависимость темпа самосогревания $\Delta t/\Delta \tau$ от влажности травы

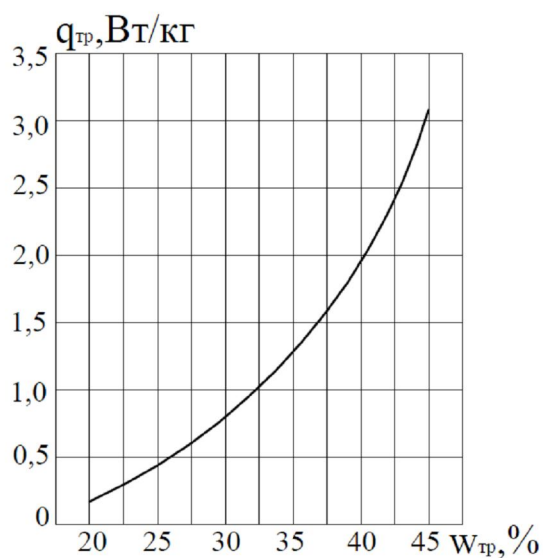


Рис. 1.6. Удельные биологические явные тепловыделения травы

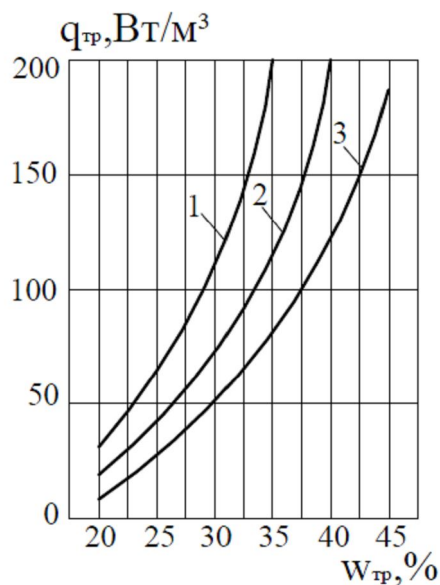


Рис. 1.7. Явные тепловыделения слоя травы плотностью: 1 – 60 кг/м³; 2 – 100 кг/м³; 3 – 150 кг/м³

Аппроксимация полученной экспериментально в натуральных условиях и представленной на рис. 1.6 кривой дала следующие результаты:

$$q_{\text{тр}} = 383,2w_{\text{тр}}^{4,4} \exp(-2,925w_{\text{тр}}) \quad (1.8)$$

Удельные явные выделения теплоты $q_{тр}$, Вт/м³ при известных значениях насыпной плотности слоя сохнувшей травы представлены графически на рис. 1.7.

Физико-механические и теплофизические характеристики биологически активных сред при хранении и сушке

Параметры воздушной среды. Основными физическими параметрами окружающей среды, влияющими на качество сочного растительного сырья, являются температура t_v , относительная влажность ϕ_v , подвижность v_v и газовый состав воздуха, которые изучены достаточно полно, дифференцированы по видам продукции и периодам хранения.

Обосновано понятие биологического нуля ($t = 4$ °С), который характеризует *оптимальную температуру хранения* любого сочного растительного сырья [76]. Снижение температуры хранения уменьшает интенсивность биохимических процессов, ограничивает развитие фитопатогенных микроорганизмов. Пределом снижения температуры при хранении считается температура замерзания воды в сырье $t_3 = -1,0 \dots -2,5$ °С.

Оптимальный влажностный режим насыпи сочного растительного сырья – это режим, формируемый под влиянием теплоты дыхания и испарительной способности продукта при полной его защите от внешних теплопритоков [42]. Равновесная относительная влажность воздуха ϕ_p над поверхностью продукции определяется коэффициентом депрессии раствора:

$$\varepsilon_k = p_{п.н} / p_{пр} = 103 / (103 + \Delta t_3), \quad (1.9)$$

где $p_{п.н}$ и $p_{пр}$ – соответственно, насыщающие упругости пара над чистой водой и над раствором, Па; Δt_3 – понижение температуры замерзания клеточного сока; для клубней картофеля $\Delta t_3 = 1,3$ °С; для других овощей величина Δt_3 изменяется от 1,0 до 2,5 °С.

Значения ε_k по (1.9) лежат в пределах 0,985...0,995. В практике хранения значения относительной влажности воздуха в хранилищах для раз-

личных видов продукции обычно несколько ниже, $\varphi_v = 90...97\%$. На поверхности сочного растительного сырья насыщающая упругость водяного пара, соответствующая температуре поверхности, превышает упругость пара в окружающей среде. Живая ткань, выделяя теплоту при дыхании, имеет температуру выше, чем окружающая среда, что вызывает испарение влаги с ее поверхности даже при относительной влажности окружающего воздуха $\varphi_v = 100\%$. Влагообмен происходит медленно, углубления зоны испарения в элементах продукции не происходит.

Хранение в регулируемой газовой среде затормаживает процессы дыхания при увеличении концентрации углекислого газа K_{CO_2} и понижении концентрации кислорода (K_{O_2}). В холодильных камерах с регулируемой газовой средой для плодоовощной продукции принимаются $K_{O_2} = 3 \pm 1 \%$, $K_{CO_2} = 5 \pm 1 \%$, $K_{N_2} = 92 \pm 1 \%$. В отечественных и зарубежных нормах отсутствуют указания по применению регулируемой газовой среды в хранилищах без искусственного охлаждения.

Значения подвижности воздуха в насыпях сочного растительного сырья лежат в пределах $u = 0,04...0,2$ м/с и не должны превышать максимальных значений $0,4...0,5$ м/с для предотвращения вырывание воздухом воды из сырья [61]. С теплофизической точки зрения для поддержания температурного режима насыпи клубней высотой h необходимы минимальные скорости воздуха u_{min} и удельные расходы воздуха L_{min} , приведенные в табл. 1.2 [17].

Т а б л и ц а 1.2

Значения u_{min} и L_{min} для насыпи клубней

| Высота насыпи h , м | u_{min} , м/с | L_{min} , $M^3/(M^2 \cdot \text{ч})$ |
|-----------------------|-----------------|----------------------------------------|
| до 1,0 | 0,075 | 110 |
| 1,0...2,0 | 0,10 | 145 |
| 2,5 | 0,15 | 215 |
| 4,0...5,5 | 0,25 | 360 |
| более 5,5 | более 0,35 | более 500 |

Насыпная плотность сочного растительного сырья: картофеля $\rho_n = 680 \text{ кг/м}^3$; свеклы и моркови $\rho_n = 600 \text{ кг/м}^3$; лука $\rho_n = 580 \text{ кг/м}^3$; белокочанной капусты от 250 до 400 кг/м^3 . Пористость насыпей ($\Pi = 1 - \rho_n / \rho_\phi$): картофель $\Pi = 0,38 \dots 0,43$; свекла столовая и морковь $\Pi = 0,45 \dots 0,56$; лук репчатый $\Pi = 0,35 \dots 0,37$. Увядание сырья, его усадка, механическая засоренность насыпей уменьшают значения пористости на 25...35%.

Допустимая высота насыпей здоровых клубней и корнеплодов в реальных условиях с учетом физиологического состояния и качества средне-реализуемого в практике хранения сырья составляет: для картофеля $h \leq 5 \dots 6 \text{ м}$; для белокочанной капусты и моркови $h \leq 2,8 \text{ м}$; для столовой свеклы $h \leq 4 \dots 5 \text{ м}$; для лука $h \leq 4,0 \text{ м}$.

Обобщенные данные по изменению насыпной плотности *рассыпного сена* ρ_n приведены в табл. 1.3. Плотность соломы в скирдах $\rho_n = 40 \dots 50 \text{ кг/м}^3$. Насыпная масса рулонного и прессованного сена достигает к концу хранения 150 кг/м^3 .

Т а б л и ц а 1.3

Насыпная плотность рассыпного сена ρ_n , кг/м^3 , при продолжительности хранения в скирде

| Вид сена | 3...5 дней | 1 месяц | 5 месяцев | 6 месяцев |
|---------------------------------------------------|------------|---------|-----------|-----------|
| Крупнотравное, тростниковое | 37...42 | 45...51 | 50...55 | 51...61 |
| Злаковое, злаково-разнотравное | 40...50 | 48...61 | 54...65 | 58...70 |
| Злаково-бобовое сеяное и с естественных сенокосов | 55...57 | 67...70 | 72...78 | 75...84 |
| Бобовое | 57...66 | 70...77 | 75...83 | 80...85 |

Зависимость внешней пористости сена аппроксимируется выражением $\Pi = 99,0 - 0,353\rho_n$. Полная пористость учитывает воздушные объемы, находящиеся как между частицами структуры, так и внутри них.

Аэродинамическое сопротивление насыпи клубней Δp_o , Па/м, выражается зависимостью (до и после усадки соответственно) [18]:

$$\Delta p_o = 125u_\phi; \quad \Delta p'_o = 135u_\phi, \quad (1.10)$$

где u_ϕ – скорость набегающего на насыпь воздуха, м/с: $u_\phi = u$ П.

Значения аэродинамических сопротивлений чистых и загрязненных механическими примесями насыпей других видов сочного растительного сырья приведены в [18].

Удельные потери давления в слое травы при одномерной фильтрации воздуха составляют, Па/м, [70]:

$$\Delta p_o = K\rho_n^m u_\phi^n. \quad (1.11)$$

Для рассыпного сена и соломы при продувке параллельно естественного уплотнения $K = 0,092$, при передувке перпендикулярно уплотнению $K = 0,054$; для сильно облиственного сена $m = 2,74$, $n = 1,54$, для слабо облиственного сена $m = 2,40$, $n = 1,60$; для соломы $m = 1,20$, $n = 1,60$ независимо от направления продувки.

Значения Δp_o , Па/м, тюков сена минимальны при направлении движения воздуха перпендикулярно прессованию. Влажность сена или травы оказывает незначительное влияние на аэродинамическое сопротивление.

Теплофизические характеристики продукции. Значения теплофизических показателей клубнекорнеплодов и травы в пределах практической точности коррелируются с содержанием сухих веществ $n_{с.в}$, %, [42, 85]. Теплоемкость сухих веществ картофеля и овощей $c_{с.в} = 1,4$, травы $c_{с.в} = 1,2$ кДж/(кг °С), коэффициент теплопроводности сухих веществ картофеля $\lambda_{с.в} = 0,255$ Вт/(м °С). Для продукции (каркаса насыпи) значения массовой теплоемкости c_k , коэффициентов теплопроводности λ_k и температуропроводности a_k приведены в табл. 1.4 [17]. С погрешностью до 6 % для всех видов сочного растительного сырья коэффициент теплопроводности определяется зависимостью $\lambda_k = 0,62 - 0,0074n_{с.в}$ [43].

На значения теплофизических показателей травы оказывает влияние ботаническая часть растения (листья, стебли), как показано на рис. 1.8.

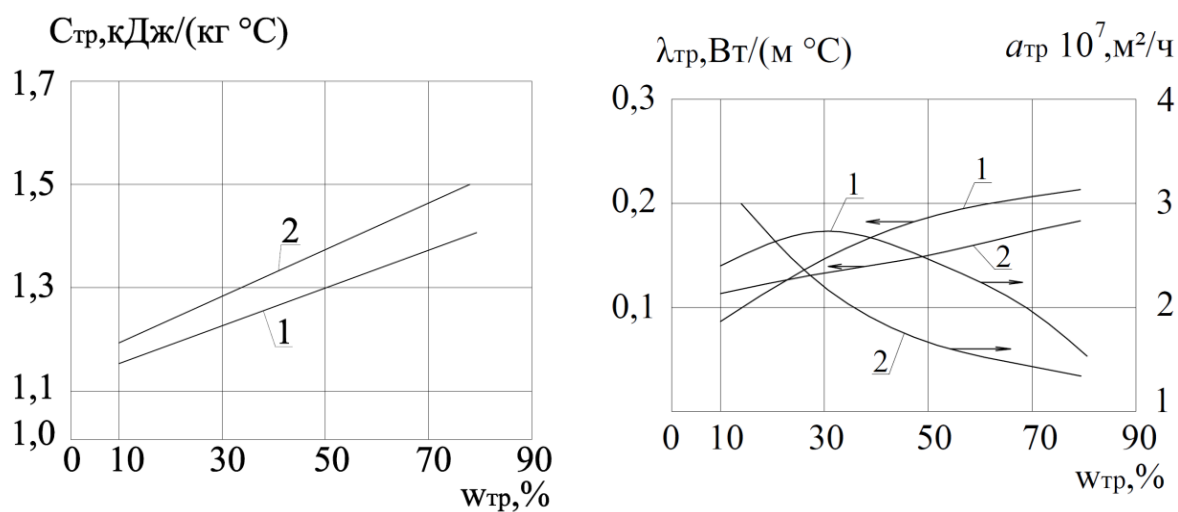


Рис. 1.8. Теплофизические характеристики травы: 1 – листьев; 2 – стеблей

Т а б л и ц а 1.4

Значения c_k , λ_k и a_k для сочного растительного сырья

| Продукция | c_k , кДж/(кг °С) | λ_k , Вт/(м °С) | a_k , м ² /с |
|----------------------|---------------------|-------------------------|---------------------------|
| Картофель | 3,30...3,80 | 0,52...0,66 | 12,27...15,90 |
| Капуста белокочанная | 3,49...3,97 | 0,34 | 12,20...13,90 |
| Морковь | 3,61...3,82 | 0,48...0,66 | 12,70...15,90 |
| Свекла столовая | 3,61...3,82 | 0,48...0,66 | 12,00...18,00 |
| Лук | 3,78 | 0,50...0,60 | 13,90 |

Коэффициент температуропроводности листьев имеет перелом в области их влажности $w_{тр} = 35...40$ %, что объясняется переходом воды в листьях только в связанное состояние [24].

Объемная теплоемкость насыпи сочного растительного сырья или сохнувшей травы, в силу преобладания величины плотности каркаса над плотностью воздуха ($\rho_k \gg \rho_v$) и удельной теплоемкости каркаса над теплоемкостью воздуха ($c_k \gg c_v$), с достаточной для инженерных расчетов точностью составляет $c_n = c_k \rho_k (1 - \Pi)$.

В пористой среде передача теплоты происходит теплопроводностью λ_t , конвекцией λ_k и излучением λ_n . Все виды переноса теплоты в насыпях обычно заменяют значением эффективной теплопроводности $\lambda_{эф}$ [56]: $\lambda_{эф} = \lambda_t + \lambda_k + \lambda_n$. В связи с малой разностью температур поверхности сочного растительного сырья или сохнувшей травы и продуваемого воздуха в насыпи лучистой составляющей пренебрегаем.

Оценка соотношения кондуктивного и конвективного переноса теплоты при наличии подвижности воздуха в слое осуществляется коэффициентом конвекции $\varepsilon_k = \lambda_{эф} / \lambda_n$. Отношение условной эффективной теплопроводности к реальной λ_n для замкнутых воздушных прослоек $\varepsilon_k = 1,0$, когда число Рэлея $Ra = (Gr \cdot Pr) < 10^3$ [43, 56]. При других значениях числа Ra величина ε_k составляет:

$$\begin{aligned} \varepsilon_k &= 0,105Ra^{0,3} && (10^3 < Ra < 10^6); && (1.12) \\ \varepsilon_k &= 0,40Ra^{0,2} && (10^6 < Ra < 10^{10}). \end{aligned}$$

Естественная конвекция становится преобладающим фактором переноса теплоты в пористых средах, начиная с числа $Ra = 10^4 \dots 10^6$ [4].

В насыпях сочного растительного сырья при естественной конвекции $\varepsilon_k \gg 70$ [4].

Поверхность влагообмена сочного растительного сырья и травы с воздухом состоит из чередующихся «влажных» участков $\varepsilon_n S_y$, выделяющих скрытую теплоту в виде водяных паров, и «сухих» $\varepsilon_n (1 - S_y)$, отдающих при охлаждении только явную теплоту [43]. При смоченной водой или снятой кожуре коэффициент испарительной способности сырья $\varepsilon_n = 1,0$, для периода покоя клубней картофеля $\varepsilon_n = 0,009 \dots 0,012$, у луковиц $\varepsilon_n = 0,002 \dots 0,003$, у свеклы столовой $\varepsilon_n = 0,20 \dots 0,30$, у белокочанной капусты $\varepsilon_n = 0,37 \dots 0,45$, у моркови $\varepsilon_n = 0,35 \dots 0,40$. В процессе длительного хранения значения коэффициента ε_n уменьшаются.

Глава 2. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА ТЕПЛОТЫ И ВЛАГИ В БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ СИСТЕМАХ

Физико-математическое описание и решение некоторых задач тепломассопереноса

Область применения общих решений. Общие решения задач формирования температурно-влажностных полей в насыпях сочного растительного сырья и сохнущей травы громоздки, далеко не всегда допускают их простую интерпретацию. Иногда они вообще неприемлемы для получения конкретных инженерных методов расчета из-за трудностей точного числового задания и последующего соблюдения внутренних и внешних режимных условий, а также большого числа переменных. Этим обесценивается применение точной вычислительной техники. Поэтому помимо общей проблемы развития и совершенствования самой физико-математической модели возникают задачи выбора и применения ее частных решений с обоснованными упрощениями и эмпирическими коррективами.

Наиболее точно процессы тепломассопереноса воспроизводятся на основе системы уравнений Рейнольдса [15]. Система уравнений для описания процесса переноса на основе одномерной α -модели включает:

– уравнение движения (Навье – Стокса)

$$\frac{du_{\phi}}{d\tau} + \frac{1}{2} \frac{d(u^2)}{dx} = -\frac{1}{\rho_B} \frac{dp}{dx} + \Phi_x + \frac{d}{dx} \left(\xi \frac{u^2}{2} \right); \quad (2.1)$$

– уравнение неразрывности

$$\frac{d\rho}{d\tau} + \frac{d(\rho u)}{dx} = 0; \quad (2.2)$$

– уравнение баланса тепловой энергии

$$\frac{1}{u} \frac{dt}{d\tau} + \frac{dt}{dx} = \frac{\alpha_t F_{уд}}{(c_B \rho_B)_t u \Pi} (t_{пов} - t_B); \quad (2.3)$$

– уравнение баланса массы вещества в потенциалах влажности или влагосодержания

$$\frac{1}{u} \frac{d\theta}{d\tau} + \frac{d\theta}{dx} = \frac{\alpha_{\theta} F_{уд}}{(c_B \rho_B)_{\theta} u \Pi} (\theta_{пов} - \theta_B); \quad (2.4)$$

$$\frac{1}{u} \frac{\partial d}{\partial \tau} + \frac{\partial d}{\partial x} = \frac{\alpha_d F_{уд}}{\rho_B u \Pi} (d_{пов} - d_B), \quad (2.5)$$

где Φ_x – проекция плотности массовых сил на ось x ; $F_{уд}$ – площадь поверхности на 1 м длины, m^2 .

Основные сложности использования этой системы связаны с отсутствием надежно обоснованных путей численного решения ее на ЭВМ, особенно для турбулентного режима.

Процессы тепломассопереноса в дисперсных средах носят нестационарный характер, при котором функции состояния в отдельных точках слоя изменяются во времени. Тепло- и массообмен происходит в системе «поверхность продукции – влажный воздух» (α -модель). Такие процессы можно представить как переходные от некоторых неравновесных начальных состояний элементов систем к промежуточным состояниям по отношению к предельным равновесным.

Когда вместо метода итеративного подбора коэффициентов переноса α и численного решения вводятся некоторые условные разности потенциалов, зависящие от параметров сред, невозможно делать выводы о соблюдении подобия между процессами переноса теплоты и влаги. Полученные выражения можно использовать только для расчетов в диапазоне параметров, наблюдавшихся в экспериментах.

Подобие процессов переноса теплоты и влаги. В насыпях сочного растительного сырья или сохнущей травы можно выделить две области. В первом по ходу движения воздуха корректирующем слое происходит выравнивание потенциалов переноса. В основном слое температура про-

дукции t_k и воздуха t_b практически равны, относительная влажность воздуха близка к равновесной каждого вида сырья [18, 43].

Выше было показано, что при хранении у поверхности биологически активного сырья относительная влажность воздуха $\varphi_{пов} \approx 100\%$, углубление зоны испарения отсутствует. Для выявления возможности нахождения коэффициентов массоотдачи по известным закономерностям для коэффициентов теплоотдачи, т.е. для выявления подобия процессов тепло- и влагопереноса в насыпях биологически активного сырья, примем за основу анализ тепло- и массообмена при обработке воздуха в контактных аппаратах [51].

На рис. 2.1 показаны изменения величин парциальных давлений сухого воздуха $p_{с.в}$ и водяного пара $p_{п}$ в режиме испарения ($t_k > t_b$) при удалении из насыпи сочного растительного сырья генерирующей продукцией теплоты и влаги ($p_{пов} > p_b$, $p'_{с.в} < p_{с.в}$).

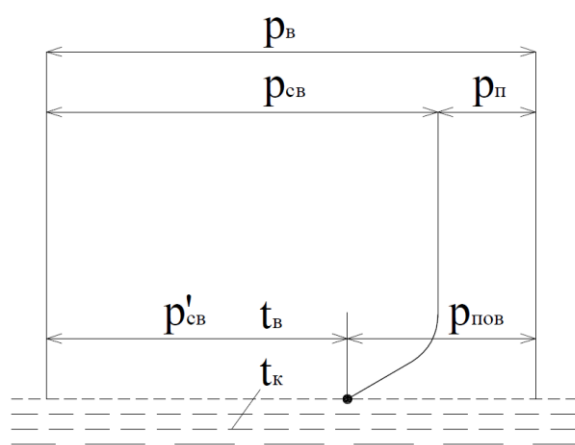


Рис. 2.1. Распределение парциальных давлений в режиме испарения

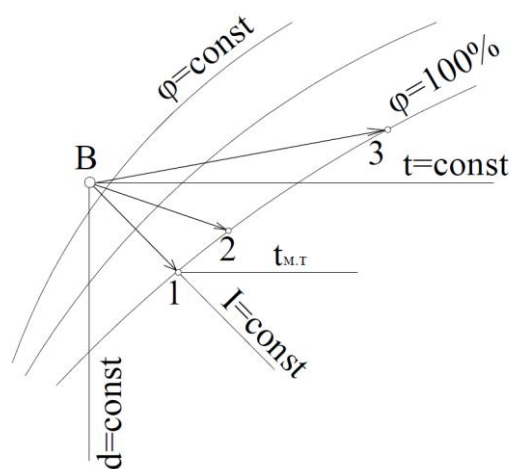


Рис. 2.2. Сочетание начальных параметров для процессов тепло- и массообмена

В общем случае при адиабатном увлажнении и молярно-молекулярном переносе теплоты и влаги отношение коэффициентов тепло- и массообмена находится в пределах [15]:

$$\alpha_t / \alpha_d = c_b, \quad (2.6)$$

т.е. выполняется соотношение Льюиса (погрешность до 5%). Таким образом, появилась возможность обосновать теплофизические условия нахождения коэффициентов массообмена по уравнениям теплообмена в «сухом» режиме для насыпей биологически активного сырья.

Согласно теореме Кирпичева-Гухмана [57], соблюдение подобия между явлениями наблюдается при наличии одновременного выполнения двух требований: описание обоих явлений одной и той же системой дифференциальных уравнений; соблюдение подобного условия однозначности. Процессы переноса теплоты и массы имеют одинаковые по структуре уравнения (2.3-2.5). Первое требование теоремы выполняется. Чтобы выделить конкретный процесс, необходимо сформулировать условия однозначности, которые содержат геометрические, физические, временные и граничные условия. Физические характеристики потоков в сходных точках насыпей биологических систем подобны. Соблюдается подобие скоростей и изменений статических давлений по высоте насыпей. В то же время геометрическое подобие границ потоков, а также подобие изменения полей температур и парциальных давлений зависят от особенностей совместного протекания процессов тепло- и массообмена.

Для характеристики различных сочетаний начальных параметров воздуха и воды введен параметрический критерий [51]:

$$O_T = (t_{m.T} - t_{kl}) / (t_{bl} - t_{m.T}). \quad (2.7)$$

При хранении сочного растительного сырья доминирующим температурным режимом по всей высоте насыпи является превышение начальной температуры каркаса t_{kl} температуры мокрого термометра $t_{m.T}$ ($t_{m.T} < t_{kl}$), в результате чего повышается энтальпия воздуха и понижается температура насыпи продукции. На рис. 2.2 показаны сочетания начальных параметров воздуха и воды, характерные для возможных процессов тепломассообмена в насыпях, а на рис. 2.3 – фрагмент графика изменений

отношений опытных коэффициентов переноса при различных сочетаниях начальных параметров воздуха и воды, выраженных через параметрический критерий O_T .

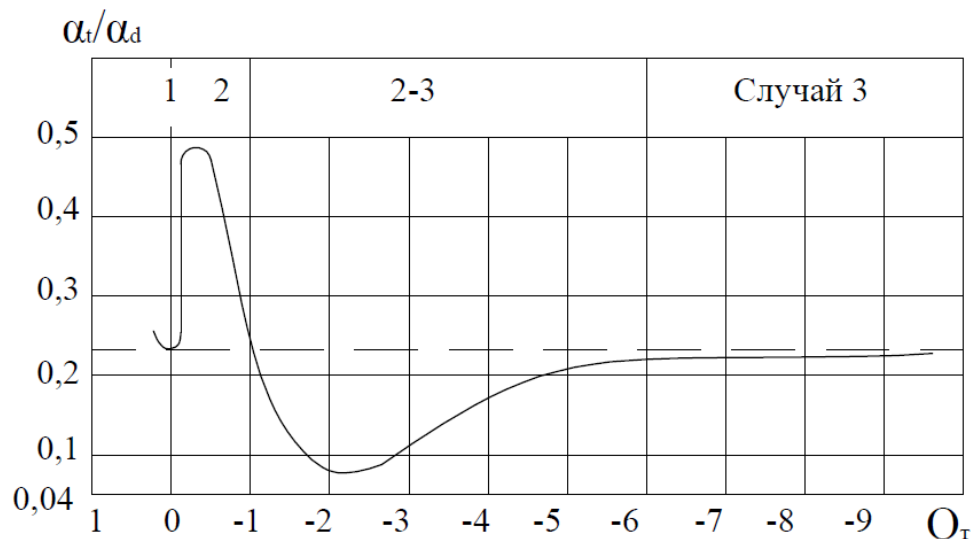


Рис. 2.3. Фрагмент отношений коэффициентов переноса

Согласно [51], если происходит адиабатное увлажнение воздуха (процесс $B-1$, рис. 2.2), то границы для потоков теплоты и влаги одинаковы, изменения градиентов температур и парциальных давлений подобны. Вследствие этого отношение (2.6) выполняется. При направлении процесса $B-2$ нарушаются как геометрические границы потоков, так и подобие изменения градиентов температур и парциальных давлений на поверхностях контакта. Случай $B-3$ отвечает условию переноса теплоты и массы влаги по всей поверхности обмена к воздуху. Геометрические границы потоков одинаковы, изменение потенциалов переноса подобно. Поэтому постоянство отношения коэффициентов переноса сохраняется. Такое же явление имеет место при отсутствии в начальный момент температурного напора ($t_{к1} = t_{в1}$), когда величина критерия $O_T = -1$.

Между процессами $B-2$ и $B-3$ рассмотрим режим, при котором температура $t_{к1}$ хотя бы на несколько градусов выше $t_{в1}$. В этих условиях парциальное давления водяных паров повышается, а результирующий явный

теплообмен незначителен. При таком режиме нарушаются равенство геометрических границ потоков теплоты и массы и подобие изменения градиентов температуры и парциальных давлений ($\alpha_t / \alpha_d < c_B$).

Пользуясь рис. 2.3, можно применительно к слою биологически активной продукции оценить границы, в которых используются методы расчетов, основанные на равенстве отношений коэффициентов тепло- и массопереноса. Сказанное выше справедливо, если перенос теплоты и влаги определяется молярной составляющей [14, 50, 51, 57]. Тогда для расчета массообмена применимы уравнения, полученные в результате изучения аналогичного ему процесса теплообмена. Для этого в последних заменяют тепловые числа Nu_t , Pr_t и Gr_t на соответствующие диффузионные числа Nu_d , Pr_d и Gr_d .

Для воздуха $Pr_t = 0,71$, $Pr_d = 0,60$ [75]; коэффициент объемного расширения воздуха $\beta = 1/273$, 1/град., коэффициент диффузии равен [75]:

$$D = 0,0754(T/273)^{1,89} 760 / p_6. \quad (2.8)$$

Имеет место аналогия тепло- и массообмена при $\phi_B \rightarrow 100\%$ (случаи *B-1*, *B-3* на рис. 2.2 и 2.3), т.е. отношение (2.6) выполняется и $Nu_t = Nu_d$. Поэтому при расчете возможно использовать зависимость для теплообменного числа Nu_t :

$$Nu_t = Nu_d = 2 + 0,85 Re^{0,52} Pr_d Gu^{0,135}. \quad (2.9)$$

В диапазоне $t = -1,5 \dots 2,0$ °C $Gu^{0,135} \approx 0,464$.

Выполнение равенства (2.6) при нагреве и увлажнении воздуха, т.е. в процессах, аналогичных протекающим в насыпях биологически активной продукции, показано также в экспериментальных исследованиях В.П. Исаченко ($Nu_t / Nu_d = 0,90 \dots 1,08$ [46], Л.Д. Бермана ($Nu_t / Nu_d = 1,046$ [6], в области высоких относительных влажностей воздуха А.В. Нестеренко [62], Е.Е. Карписа [49], О.Я. Кокорина [51], а при малой интенсивности влагообмена А.А. Гоголина [37]. Однако сложность определения коэффициента

α_d настолько велика, что точность его расчета далека от удовлетворительной. Отклонения экспериментальных данных для слоя насадки от расчетных составляет 25%, а для ряда систем еще больше [52].

Шкала потенциала тепломассопереноса. Шкала стояния влаги в виде *упругости водяных паров*, используемая многими авторами для описания процессов влагообмена на поверхности биологически активной продукции [7, 26, 80, 92, 101 и др.] в виде

$$j = \alpha_p (p_{\text{пов}} - p_{\text{в}}), \quad (2.10)$$

неприменима при охлаждении сырья из-за переменных значений упругости водяного пара у поверхности сырья и в воздухе. В (2.10) они считаются постоянными.

М.А. Волковым [28] предложено за обобщающую силу внешнего массообмена при определении потерь влаги хранящихся в неизотермических условиях продуктов принимать *градиент потенциала вещества*:

$$\Delta\Psi = (\mu_o - \mu) + \theta'_T (T_o - T); \quad j_\Psi = \alpha_\Psi \Delta\Psi, \quad (2.11)$$

где θ'_T – температурный коэффициент потенциала массопереноса; μ – изобарно-изотермический химический потенциал.

Количественно значение химического потенциала μ показывает энергию, затраченную на удаление 1 киломоля воды из влажного материала, и определяется по формуле [28, 56]:

$$\mu = -RT \ln \varphi. \quad (2.12)$$

При высоких значениях относительной влажности воздуха, когда $\varphi = 1,0$, химический потенциал $\mu = 0$ ($\mu = -RT \ln 1,0 = 0$).

Химический потенциал μ определяется в изотермических условиях через относительную влажность воздуха φ , которая не является потенциалом переноса в неизотермических условиях [13]. Проанализировав уравнение свободной энергии Гиббса в состоянии равновесия $\Delta G^o = -RT \ln K_p$ и

преобразовав его с учетом зависимости $\Delta G^{\circ} = \Delta I^{\circ} - T\Delta S^{\circ}$ к виду

$$\ln K_p = -\Delta I^{\circ} / RT + \Delta S^{\circ} / R, \quad (2.13)$$

Ф. Фрэнкс [9] показал, что выражение (2.13) приводит к недразумениям из-за жестких требований к точности экспериментального определения значений ΔI° и ΔS° . Температурный интервал любой биохимической системы составляет от 0 до 50 °С, что соответствует колебаниям значений $(\Delta T)^{-1}$, равным всего лишь $5,6 \cdot 10^{-4}$. Становится бессмысленным установление величин ΔI° и ΔS° , если ошибка эксперимента превышает 1%. Из-за логарифмического вида графика (2.13) физические величины, пропорциональные концентрациям K_p , особенно в близких к 1,0 областях, что наблюдается в насыпях сочного растительного сырья, имеют одинаковый наклон графика в координатах $\ln K_p$ от T^{-1} и дают кажущуюся константу K_p .

Перечисленные недостатки зависимости (2.11) не позволяют считать предлагаемый градиент потенциала вещества достаточно точным показателем при количественной оценке массопереноса в системе «поверхность сочного растительного сырья – влажный воздух».

Разработанная профессором В.Н. Богословским [11, 13] теория расчета интенсивности тепломассопереноса позволяет описать физические явления с помощью одного обобщающего показателя (*потенциала влажности*) без анализа микроявлений и частных закономерностей. Все свойства системы разделены на характеристики интенсивности, не зависящие от массы или числа частиц фазы (T, p, μ, θ и др.) и обуславливающих направление и предел самопроизвольного протекания переходных процессов переноса, и факторы, характеризующие емкостные свойства (F, S, V, m).

Анализируя уравнения состояния влажного материала как открытой гетерогенной системы

$$dF_{\text{ж}} = -S_{\text{ж}}dT_{\text{ж}} + (p_{\text{ж}}/\rho_{\text{ж}} + \mu_{\text{ж}} + \mu_{\text{ж}i} + \theta_{\Gamma})dm_{\text{ж}} = 0, \quad (2.14)$$

он показал, что величина в скобках определяет изменение массы фазы и является по физическому смыслу термодинамическим потенциалом фазы θ (потенциалом влажности):

$$\theta = -p_{\text{ж}} / \rho_{\text{ж}} + \mu_{\text{ж}} + \mu_{\text{жи}} + \theta_{\Gamma}. \quad (2.15)$$

Величина потенциала влажности θ зависит от давления $p_{\text{ж}}$, химического потенциала $\mu_{\text{ж}}$, потенциала растворенного вещества $\mu_{\text{жи}}$, измерить которые физически непосредственно в опыте нельзя. Для построения численной шкалы θ принято влагосодержание фильтровальной бумаги при эталонной температуре $t = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Поток влаги с поверхности биологически активного сырья, выраженный через разности потенциалов влажности, равен:

$$j_{\theta} = \alpha_{\theta} (\theta_{\text{пов}} - \theta_{\text{в}}). \quad (2.16)$$

Каждому значению θ соответствует множество сочетаний равновесной влажности и температуры. Точная фиксация их осуществляется значением относительного потенциала влажности:

$$\varphi_{\theta} = f_1(\theta) / f_1(\theta_{\text{мс}}), \quad (2.17)$$

где $\theta_{\text{мс}}$ – потенциал влажности, соответствующий максимальной сорбционной влажности.

Проведенная экспериментальная проверка теории потенциала влажности показала ее правомерность как при изотермическом, так и при неизотермическом влажностном равновесии [11, 13]. Для расчетов интенсивности влагообмена в биологически активной системе требуется дальнейшее изучение и нахождение количественных значений разностей потенциалов влажности $\Delta\theta$ и коэффициентов массоотдачи α_{θ} в насыпях из-за специфических особенностей формирования в них температурных и влажностных полей.

Профессором В.З. Жаданом разработана *теория тепловлажностных процессов* в насыпях сочного растительного сырья, позволяющая описать

нестационарный процесс тепло- и влагообмена при хранении продукции и определить общую массу влаги W , ассимилированную продуваемым через слой воздухом [42, 43]:

$$W = Q/\varepsilon_t, \quad (2.18)$$

где Q – суммарные явные внешние и биологические теплопритоки к вентиляционному воздуху; ε_t – тепловлажностная характеристика процесса изменения состояния воздуха в насыпи сочного растительного сырья (на $I-d$ -диаграмме влажного воздуха):

$$\varepsilon_t = 6385 - 147t \quad \text{при } 0^\circ\text{C} \leq t \leq 15^\circ\text{C}; \quad (2.19)$$

$$\varepsilon_t = 6385 - 1,21t^2 - 335t \quad \text{при } -25^\circ\text{C} \leq t \leq 0^\circ\text{C}, \quad (2.20)$$

где t – средняя температура охлаждающего воздуха.

Влагообмен в слое рассматривается не как психрометрическая закономерность (испарение воды в воздух), а как процесс обработки продуваемого воздуха покровными участками хранящихся продуктов, выделяющих явную и скрытую теплоту. Данная трактовка составляет термодинамическую основу и сущность теории, а зависимость (2.18) – энергетическую основу интенсивности влагообмена. Математическим описанием тепловлажностного процесса в слое является равенство:

$$\varphi_p = \varphi_v = \text{const}, \quad (2.21)$$

показывающее постоянство дефицита влагосодержания воздуха по высоте охлаждаемой насыпи ($1 - \varphi_p = \text{const}$, рис. 2.4).

На универсальность зависимости (2.18) при нахождении потерь влаги сочным растительным сырьем указывают многие исследователи [17, 18, 27, 47, 84, 86]. В редакционной статье журнала «Холодильная техника» [44] в результате дискуссии ведущих ученых страны по тепломассообмену и холодильной технике формула (2.18) признана справедливой для равновесных процессов тепломассообмена в слое сочного растительного сырья. Отсутствие соблюдения равенства (2.21) в корректирующем слое насыпи не снижает практической ценности зависимости (2.18), позволяющей оп-

ределять потери влаги в слое биологически активного сырья в зависимости от поступления суммарного количества явной теплоты к вентиляционному воздуху. Нельзя считать убедительными возражения о сложности нахождения коэффициента ε_t , приводимые в [55], значения которого однозначно определяются или по формулам (2.19 или 2.20) или непосредственно по I - d -диаграмме влажного воздуха.

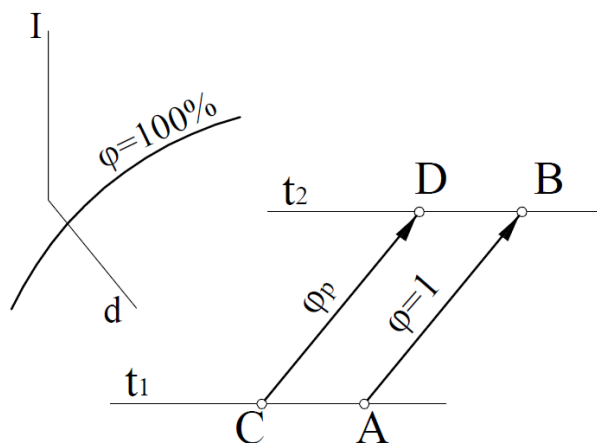


Рис. 2.4. Изменение состояния воздуха в охлаждаемой насыпи: AB – пограничная кривая I - d -диаграммы; CD – процесс в насыпи

Некоторые решения задач тепломассопереноса

Насыпь сочного растительного сырья. *Общие положения.* Задачи формирования температурно-влажностных полей в насыпях сочного растительного сырья решаются на основе одномерной α -модели, которая подразумевает знание численных значений коэффициентов тепло- и массоотдачи с поверхности продукции. Среди теоретических и экспериментальных исследований по определению величин коэффициентов *теплообмена* α_t при турбулентном течении воздуха в насыпях биологически активных сред, наиболее близко подходящих по структурному составу к сочному растительному сырью, отметим, например, работы [4, 8, 35, 54, 57, 89].

Данные по нахождению коэффициента α_t в слое при ламинарном движении обобщены М.Э. Аэровым [4].

Численное сопоставление значений коэффициентов теплоотдачи для насыпи клубней и некоторых биологически нейтральных сред со средним диаметром элементов слоя $d_{\text{ср}} = 0,05$ м, пористостью $\Pi = 0,4$, удельной площадью поверхности $S_y = 120 \text{ м}^2/\text{м}^3$ в режиме турбулентного течения воздуха приведены в табл. 2.1 [17].

Основной вывод анализа сопоставления результатов, приведенных в табл. 2.1, заключается в разбросанности величин α_t . Например, по (2.23) и (2.30) они достигают 12 раз, по (2.22) и (2.23) расхождения составляют 8 раз. Даже экспериментально полученные данные для клубней величины α_t по (2.25) и (2.26) различаются в 2 раза. Поэтому определение коэффициентов теплоотдачи, отражающих реальные особенности процессов в насыпях каждого вида продукции, является первостепенной и перспективной задачей теоретических и экспериментальных исследований.

Температурное поле в элементах слоя можно считать равномерным, а внешний конвективный теплообмен лимитирующей составляющей при числах $Fo \geq 0,3 \dots 0,4$ и $Bi_t \leq 0,1 \dots 0,25$ [80]. Для капусты, имеющей $Bi_t \approx 1,3$, необходимо учитывать инерцию в передаче теплоты по объему кочанов:

$$\alpha_t^* = \alpha_t (1 + 0,2Bi_t). \quad (2.32)$$

Критериальные уравнения расчетов коэффициентов массоотдачи α_d при усушке хранящейся в неизотермических условиях биологически активной продукции по термическим коэффициентам α_t не учитывают конкретных физических условий на поверхностях испарения. Профессор В.З. Жадан [43] ввел в уравнение Дальтона опытный коэффициент $\varepsilon_{\text{и}}$, показывающий долю «влажного» участка поверхности продукции:

$$j_p = \alpha_p \varepsilon_{\text{и}} S_y (p_{\text{пов}} - p_{\text{в}}) \tau. \quad (2.33)$$

Анализ формулы (2.33) показывает [42], что «...изменение любого фактора испарительной способности продукции...влечет за собой соответствующее (корректирующее) изменение дефицита влажности воздуха....»

Т а б л и ц а 2.1

Сопоставление значений коэффициентов теплоотдачи α_t в слое

| №№ формул | Расчетные зависимости | α_t , Вт/(м ² °С), при подвижности воздуха u , м/с, в насыпи | | | | | | | Источник |
|--------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| | | 0,05 | 0,10 | 0,15 | 0,20 | 0,25 | 0,30 | 0,35 | |
| 2.22 | $Nu_t=0,106Re \quad 20 \leq Re \leq 200$ | 3,83 | 7,94 | 11,49 | - | - | - | - | [2] |
| | $Nu_t=0,61Re^{0,67} \quad Re > 200$ | - | - | 11,49 | 13,54 | 15,74 | 17,76 | 19,69 | [2] |
| 2.23 | $\alpha_t=0,05/d_{cp} + 7,27u^{0,67}/d_{cp}^{0,33}$ | 1,59 | 1,83 | 2,04 | 2,23 | 2,40 | 2,56 | 2,71 | [43] |
| 2.24 | $\alpha_t = 5 + 3,4u$ | 6,01 | 6,21 | 6,41 | 6,61 | 6,80 | 7,00 | 7,20 | [65] |
| 2.25 | $Nu_t = 2,7+0,278Re^{0,608} \quad Re > 400$ | - | - | 3,91 | 4,49 | 5,01 | 5,58 | 6,07 | [39] |
| 2.26 | $\alpha_t=0,075\lambda_B(1-\Pi)u_\phi/vd_{cp}\Pi^2 S_y$ | 1,70 | 3,40 | 5,08 | 6,79 | 8,47 | 10,16 | 11,86 | [48] |
| 2.27 | $Nu_t = 2+0,6Re^{0,5}$ | 3,54 | 4,59 | 5,41 | 6,09 | 6,69 | 7,23 | 7,73 | [8] |
| 2.28 | $Nu_t=0,8Re^{0,7}Pr^{0,33}$ | 7,11 | 11,6 | 15,34 | 18,76 | 21,94 | 24,95 | 27,78 | [89] |
| 2.29 | $Nu_t=1,95Re^{0,49}Pr^{0,33} \quad Re < 350$ | 7,02 | 9,89 | 12,03 | 13,85 | 15,21 | - | - | [81] |
| | $Nu_t=1,064Re^{0,59}Pr^{0,33} \quad Re > 350$ | - | - | - | - | 15,48 | 17,36 | 18,53 | [81] |
| 2.30 | $Nu_t=1,166Re^{0,725}Pr^{0,33}$ | 10,2 | 15,6 | 17,05 | 19,4 | 23,47 | 26,9 | 31,65 | [4] |
| 2.31 | $Nu_t=1,32 \cdot 10^5 u(1-\Pi)/\rho_B \Pi d_3 S_y'$ | 4,25 | 8,50 | 12,75 | 17,0 | 21,26 | 25,51 | 29,76 | [27] |

Следовательно, продукция с большей испарительной способностью в штабеле как бы сама себя защищает от больших потерь влаги, формируя свой влажностный режим». Имеет место саморегулирование влажностного режима, а коэффициент массоотдачи является производной величиной теплофизических свойств поверхности сочного растительного сырья и параметров влажного воздуха.

Решение задач теплообмена в слое идеальных биологически неактивных шаров при одномерной вынужденной конвекции в пренебрежении контактной теплопроводности при $Bi_t = 0$ впервые приведены в работах А. Анцелиуса, Х. Шумана, В. Нуссельта [81]. Позднее эта задача решена с учетом внутреннего теплообмена ($Bi_t > 0$) [45], в критериальной форме решение приведено А.В. Лыковым и Ю.А. Михайловым [57]. Аналитическое решение обобщенной задачи теплообмена для произвольных начальных и граничных условий получено в [80].

Развитие теоретических решений сопряженных задач тепломассообмена в пористых средах базируется на численном моделировании с помощью ЭВМ. Однако переход от математической модели процесса к численному алгоритму для таких структур настолько сложен, что до настоящего времени полностью не реализован. Получает развитие машинный метод исследований, основанный на принципах обратной задачи теплообмена. Но широкое практическое использование таких задач применительно к теплообмену в пористых средах сопряжено со значительными трудностями из-за отсутствия эффективных алгоритмов.

На современном этапе развития исследований наиболее точным методом решения задач по теплообмену в пористых средах является теоретическо-экспериментальный. Строятся семейства теоретических кривых температур по сечению слоя. Экспериментально снимается реальная кривая изменения температуры, которая накладывается на семейство теоретичес-

ких, и по совпадению экспериментальной и одной из теоретических кривых находится коэффициент α_t .

В режиме естественной конвекции в замкнутом объеме при нагреве через те или иные ограничивающие поверхности и наличии тепловыделения элементов пористой среды анализ возникновения и интенсивности естественных токов воздуха приводится в литературе [25, 31, 73, 91, 102]. Критерием возникновения естественных конвективных токов воздуха служит число $Ra > Ra_{кр} = 40 \dots 46$.

Практические рекомендации по поддержанию заданных температурно-влажностных параметров в насыпях сочного растительного сырья базируются либо на частных эмпирических зависимостях, либо на приближенных аналитических расчетах, проведенных без комплексного учета внешних факторов, основными из которых являются наличие биологических явных тепловыделений продукции, непостоянство температуры каркаса по высоте, значения экспериментальных коэффициентов теплоотдачи в слое α_t определены для неактивных засыпок. Приведем и проанализируем ряд наиболее распространенных рекомендаций.

Имеющиеся в литературе многочисленные методики расчетов не учитывают биологические выделения явной теплоты в насыпях, например [2, 28, 34, 65, 82, 85, 92, 95], другие учитывают их частично [48].

Взяв за основу формулу $dt/d\tau = -m(t_{ср} - t_{во})$, Г.Б. Чижов [17] вычислил продолжительность охлаждения насыпи при отсутствии тепловыделений ($q_v = 0$) и при постоянной начальной ее температуре.

Б. Опхюз [65] для монофракционного слоя с величинами $d \approx 4,0$ см и $q_v = 0$ получил согласованность опытных и расчетных по уравнению Бузингера значений времени охлаждения τ до безразмерной температуры $Y_k = 0,1$ (рис. 2.5).

Ж.Н. Hunter [95] проанализировал процесс охлаждения сфер при двух значениях скорости воздуха в насыпях u и граничных условиях III рода

(рис. 2.6). Отсутствие экспериментальной проверки результатов значительно снижает ценность приведенных теоретических решений.

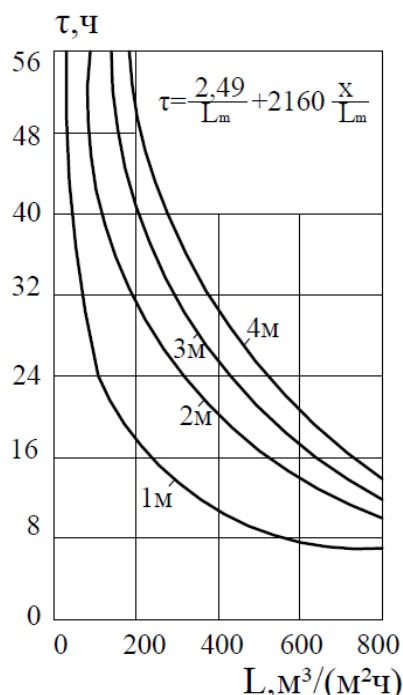


Рис. 2.5. Время охлаждения насыпи клубней до $Y_k = 0,1$

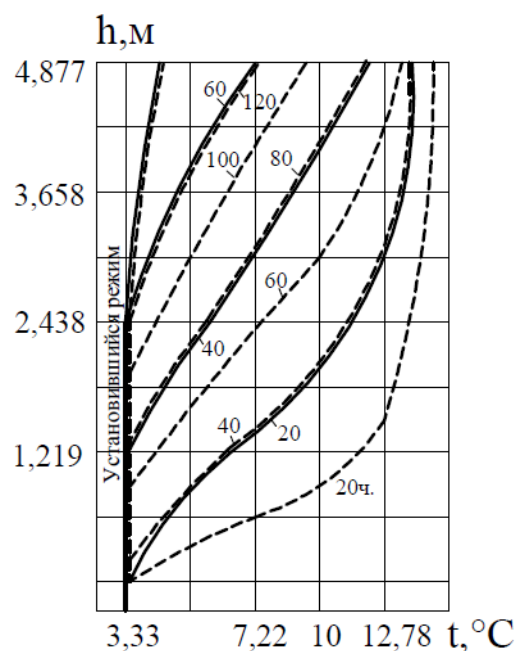


Рис. 2.6. Профиль температур при скорости в межклубневом пространстве:
 — — — $u = 1,22$ м/мин.; — — — $u = 2,44$ м/мин.

С учетом биологических тепловыделений в [5] предлагается упрощенная методика расчета производительности систем активной вентиляции картофелехранилищ по балансу явной теплоты в насыпях:

$$L_m = q_v G / c_v (t_{cp} - t_{во.ср}). \quad (2.34)$$

Применение этого метода к нестационарному режиму охлаждения вызывает необходимость введения поправочного коэффициента к величине L_m до 3,0.

Ю.П. Калугина [48], приняв постоянство температуры по высоте насыпи картофеля ($t_{ко} = \text{const}$), учла биологические тепловыделения в конечном решении путем введения «расчетной» теплоемкости $c_{кр}$, полученной пересчетом в теплоемкость клубней c_k величины:

$$c_{кр} = c_k + \frac{q_v \tau}{t_{ко} - t_{кк}} - \frac{q_v \tau i}{t_{ко} - t_{кк}}. \quad (2.35)$$

Результаты решения приведены на рис. 2.7. Введение новой величины теплоемкости не может считаться правомерным из-за постоянства теплофизических характеристик продуктов в течение периода охлаждения. Коэффициент теплоотдачи завышается практически на 20%.

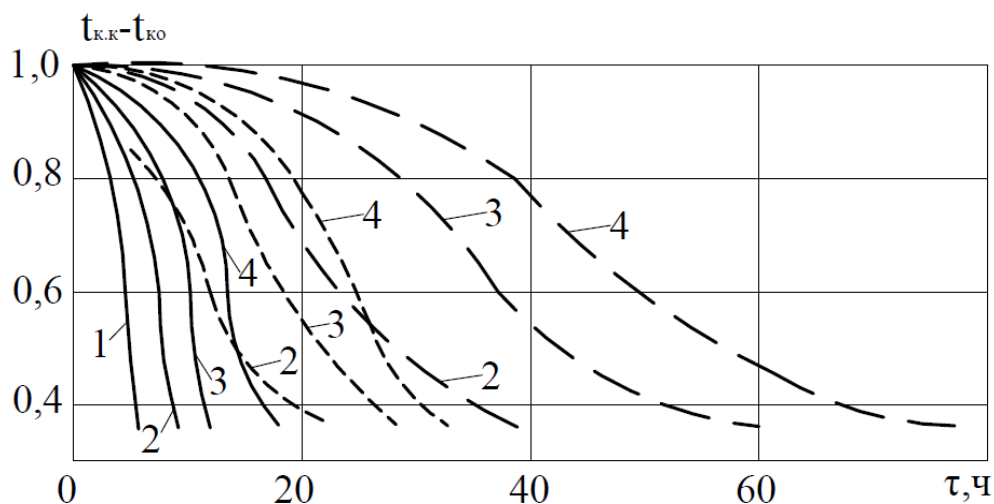


Рис. 2.7. Относительная температура насыпей клубней $t_k = f(h)$: — — — — 400 м/ч; - - - - - 200 м/ч; — — — — 100 м/ч; 1 — 1 м; 2 — 2 м; 3 — 3 м; 4 — 4 м высоты насыпи

Ряд исследователей [2, 33, 48, 86] необоснованно принимают допущение об отсутствии переноса теплоты в насыпях сочного растительного сырья естественной конвекцией. Они считают слой изотропным параллелепипедом с равномерно распределенными по объему источниками теплоты. Решение такой задачи сводилось к известному решению А.В. Лыкова для пластин [57].

Наличие явных биологических тепловыделений и естественной конвекции является причиной возникновения нарастающего по высоте насыпи профиля температуры, который в первом приближении принимали линейным: $t_k = t_{к.о.} + bx$ [43, 96]. Попыткой учесть наличие начальных градиентов температуры в насыпях является уменьшение на 20% расчетного времени охлаждения вне зависимости от конкретного анализа соответствующей динамики процесса [43].

Добавление уравнения переноса влаги и совместное решение системы балансовых уравнений тепло- и массопереноса в насыпи картофеля с постоянной начальной температурой $t_{\text{ко}} = \text{const}$ при учете явных тепловыделений q_v настолько усложнило аналитическое и численное решение на ЭВМ, что удовлетворительной сходимости численных и экспериментальных результатов добиться не удалось [98].

Учет кондуктивной составляющей теплопроводности в продольном и поперечном направлениях насыпи приводит к дальнейшему усложнению модели и неопределенностям конечных практических решений [7].

Можно согласиться с выводом Н.И Гамаюнова [29], что отсутствие экспериментальной проверки численных решений и учета начального градиента температуры по высоте слоя продукции, неточность задания коэффициентов α_t и α_d не позволяют считать обоснованными рекомендуемые введения в модель кондуктивных составляющих теплообмена. Практическая ценность решения зависит от точности полученных из опыта коэффициентов переноса. Выбор математической модели должен соответствовать степени точности их определения. Чем с меньшей достоверностью известны коэффициенты переноса, тем проще должна быть математическая модель.

В качестве примера необоснованного усложнения модели тепломассопереноса в слое сочного растительного сырья приведем данные, изложенные в [39]. Дополнительное введение в модель переменных коэффициентов теплопроводности λ_k и теплоемкости c_k продукции, коэффициента формы клубней, числа Bi при отсутствии экспериментальной проверки основных параметров переноса α_t и α_d усложнило решение задачи и не привело к более точным результатам. В конечном итоге решение сведено к известным зависимостям при $t_{\text{ко}} = \text{const}$ и $q_v = 0$ [45].

Получены решения задачи формирования температурных полей в насыпях биологически активной продукции при постоянной начальной

температуре слоя ($t_{\text{ко}} = \text{const}$) с учетом явных тепловыделений и реальной теплопроводности сырья [23]. Однако они не подтверждены экспериментально. Поэтому разработка инженерных методик расчетов и оптимизации режимов работы систем активной вентиляции выливается в предмет новых самостоятельных исследований.

При всей полезности общих аналитических решений по тепломассопереносу в слое биологически активной продукции они еще не удовлетворяют потребностям практики. В результате предпринимаются попытки логических построений на основе обобщения опытных данных. Приведем несколько характерных примеров.

Предложена графическая зависимость времени охлаждения слоя картофеля высотой $h = 4,8$ м при различных скоростях воздуха в насыпи при постоянстве явных тепловыделений ($q_v = \text{const}$) и постоянной начальной температуре слоя ($t_{\text{ко}} = \text{const}$) (рис. 2.8) [100].

Экспериментально выявлена скорость распространения фронта охлаждения насыпей картофеля и овощей при снижении их температуры наполовину $\Delta t_{0,5}$, мм/ч, (рис. 2.9) [99]:

$$u_{\Delta t_{0,5}} = 10^{-5} mL_m \rho_v + b, \quad (2.36)$$

где m и b – постоянные; для моркови и картофеля они, соответственно, равны 251,7 и 49,9, для капусты – 48,4 и 49,2.

По другим данным [96] скорость движения фронта охлаждения в насыпи клубней ($L = 70 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{ч})$, $\Delta t = 5,25 \text{ }^\circ\text{C}$) в пределах 40 мм/ч.

Натурные исследования указывают на примерно обратную пропорциональность продолжительности вентилирования слоя клубней и удельного расхода воздуха [28, 95, 96].

Имеются полученные из опытов рекомендации при расчете охлаждения насыпей моркови и столовой свеклы ($\Delta t_{\text{ко}} = 2 \dots 12 \text{ }^\circ\text{C}$, $u = 0,022 \dots 0,161 \text{ м/с}$) пользоваться зависимостью для определения времени продувки [88]:

$$\tau = A + B \left(\frac{t_{\text{ко}} - t_{\text{во}}}{u} \right) h, \quad (2.37)$$

где коэффициент $A = 1,5$, коэффициент $B = 3,05 \cdot 10^{-2}$ – для моркови; $A = 1,0$, $B = 5,45 \cdot 10^{-2}$ – для свеклы столовой.

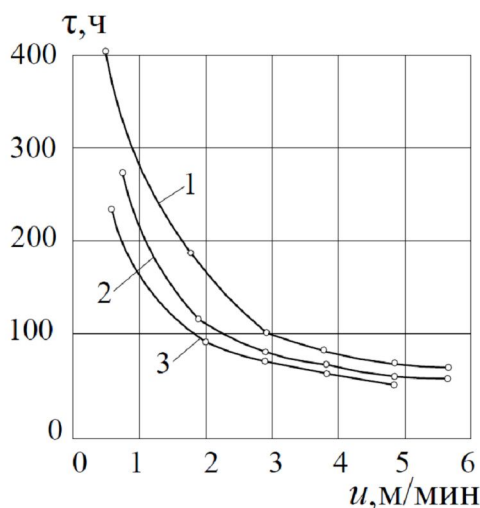


Рис 2.8. Общее время охлаждения насыпи ($t_{\text{ко}} = 18,3 \text{ }^\circ\text{C}$): 1 – общее время до $t_{\text{кк}} = 4,5 \text{ }^\circ\text{C}$; 2 – время работы вентилятора до $t_{\text{кк}} = 5,5 \text{ }^\circ\text{C}$; 3 – общее время до $t_{\text{кк}} = 7,2 \text{ }^\circ\text{C}$

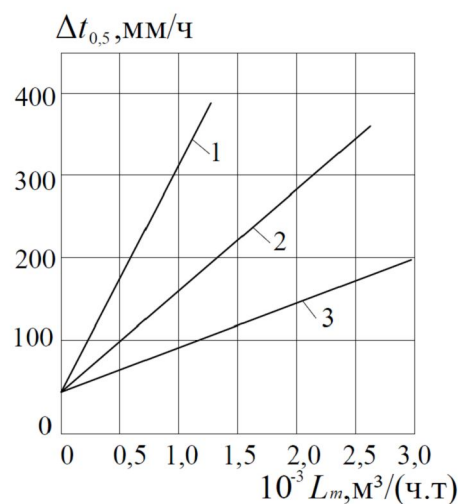


Рис. 2.9. Скорость фронта охлаждения наполовину: 1 – корнеплоды; 2 – салат, шпинат, ранняя капуста; 3 – белокочанная капуста

Аналитические зависимости по *формированию влажностных полей* в насыпях сочного растительного сырья, приводимые рядом авторов [2, 28, 48, 50, 98], не учитывают фактора саморегулирования равновесной относительной влажности воздуха φ_r самой биологически активной продукцией.

Распределение температуры и относительной влажности воздуха по высоте слоя пищевых продуктов путем решения системы балансовых уравнений дано в [28]:

$$\alpha_t (t_k - t_{\text{во}}) l_o dx = 0,278 \cdot 10^{-3} L_m \rho_B c_B dt_B; \quad (2.38)$$

$$\alpha_m [(\mu_{\text{во}} - \mu_k) + \theta'_T (t_{\text{во}} - t_k)] \varepsilon_i l_o dx = 0,278 \cdot 10^{-6} L_m \rho_B c_m d\mu_B,$$

где l_o – приведенная толщина слоя, м/т; α_m – коэффициент массообмена, кг·моль/($\text{м}^2 \text{ Дж} \cdot \text{с}$); c_m – удельная изотермическая массоемкость, кмоль/Дж.

Примеры изменения температуры картофеля t_k , воздуха t_b , химического потенциала клубней μ_k по высоте насыпи приведены на рис. 2.10 и 2.11.

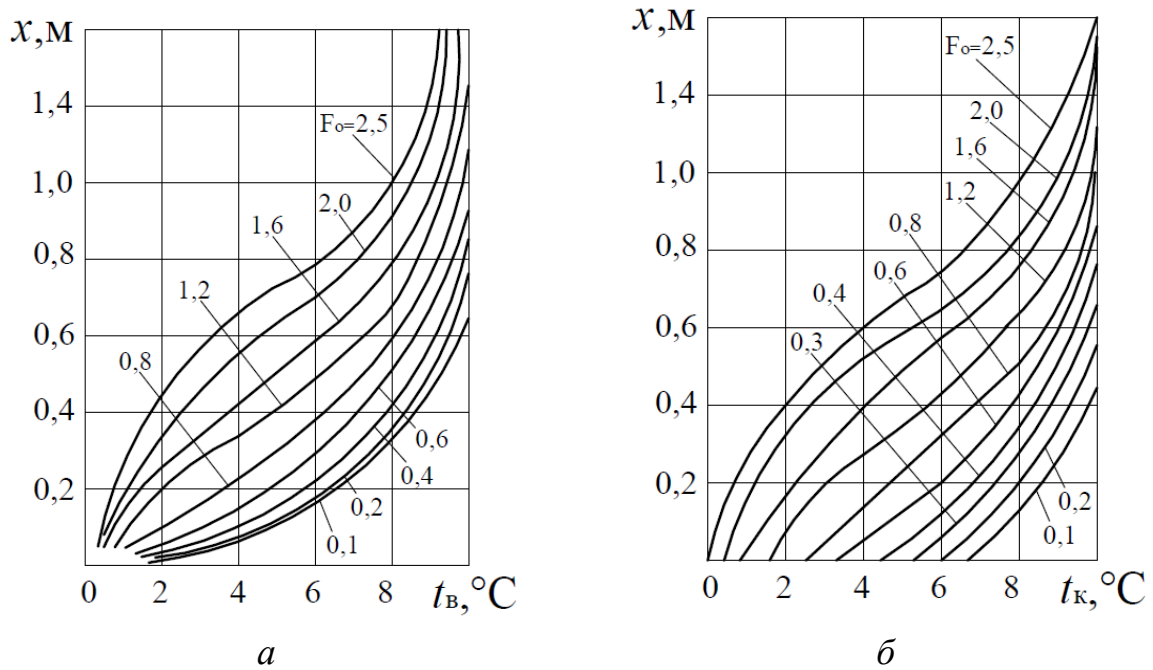


Рис. 2.10. Температурный режим в насыпи картофеля:
 а – изменение температуры воздуха; б – изменение температуры поверхности клубней

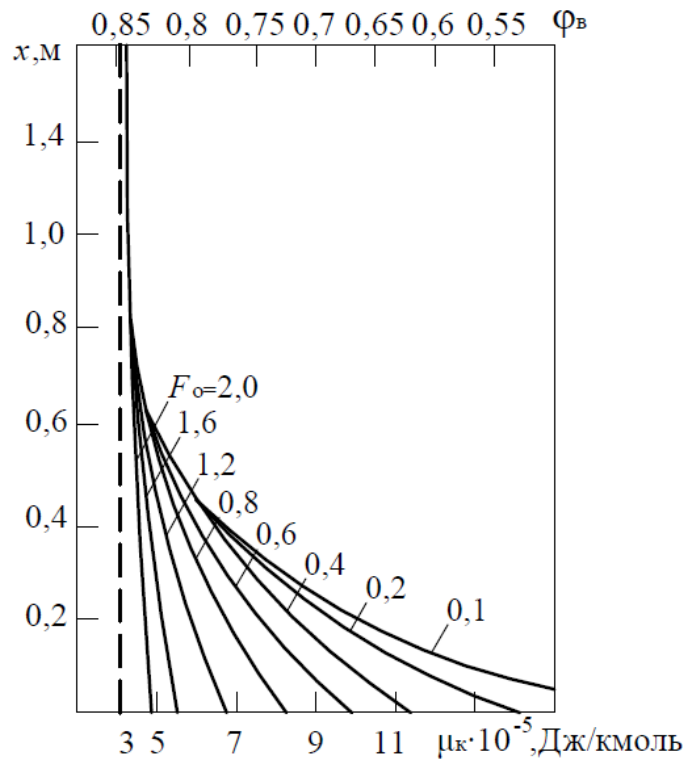


Рис. 2.11. Влажностный режим насыпи клубней

Условия примера расчета графических зависимостей на рисунках: $h = 5,0$ м, $t_{\text{ко}} = 10$ °С, $t_{\text{во}} = 0$ °С, $\phi_{\text{во}} = 0,85$, $\mu_{\text{во}} = -3,69 \cdot 10^5$ Дж/кмоль, $L_m = 70$ м³/(т·ч), $\varepsilon_{\text{и}} = 0,012$, $\alpha_t = 11,2$ Вт/(м²°С), $a_k = 1,37 \cdot 10^{-7}$ м²/с. Анализ численных решений позволяет качественно оценить интенсивность массопереноса в корректирующем (первом по ходу движения воздуха) слое насыпи.

В литературе можно встретить конкретные экспериментальные зависимости интенсивности процесса испарения влаги с поверхности биологически активной продукции типа (для картофеля):

$$\text{– лечебный период [95]} \quad W = 5,3 \cdot 10^{-4} \Delta p_{\text{в}}^{0,59} \tau^{-0,35}; \quad (2.39)$$

$$\text{– основной период [92]} \quad W = 10^{-5} (1,2 + 0,6S) \Delta p_{\text{в}}, \quad (2.40)$$

где $\Delta p_{\text{в}} = p_{\text{пов}} - p_{\text{во}}$ – дефицит парциального давления перед началом продувки, мм рт.ст.; τ – время, с; S – содержание влаги в продукте, %.

Такие зависимости не могут быть перенесены в другие микроклиматические условия хранения из-за их частного характера.

Краткий обзор современного состояния развития теоретических и экспериментальных исследований по тепломассопереносу в процессе хранения насыпей сочного растительного сырья показал отсутствие обоснованных с теплофизической точки зрения моделей переноса теплоты и влаги с поверхности продукции в воздух, позволяющих аналитическими или численными методами решать задачи формирования температурных и влажностных полей в слое. Не выявлен обобщающий потенциал тепломассопереноса в нестационарных условиях охлаждения насыпей, оказывающий определяющее влияние на режимы работы, производительность и конструктивные особенности систем обеспечения параметров микроклимата овощекартофелехранилищ.

Слой сохнущей травы. Естественная сушка в полевых условиях связана с потерями питательных веществ, достигающих 30...50 %, каротина – более 80 %. Так как единичные растения злаковых сохнут в

2...3 раза быстрее бобовых [77], ускорение в 1,5...2,0 раза естественной сушки бобовых достигается плющением [67]. Максимальные сроки заготовки сена ограничиваются появлением плесени. На рис. 2.12 показаны зависимости времени сохранности травы от температуры воздуха [69]. Рекомендуется заканчивать сушку травы за 7...10 суток [58, 60, 77]. Продолжительность сушки соломы не должна превышать времени появления плесневых грибков в примесях травы [38].

Темп самосогревания неventилируемого слоя травы составляет от 1,0 °С/ч [68] до 2...3 °С/ч [94]. При низких значениях относительной влажности вентиляционного воздуха ϕ_v дыхание обеспечивает около 25 % теплоты, требуемой для испарения, а при $\phi_v > 75\%$ – более 60%. Однако биологические тепловыделения, ускоряющие процесс сушки, связаны с потерями сухих веществ продукции [58, 69, 94].

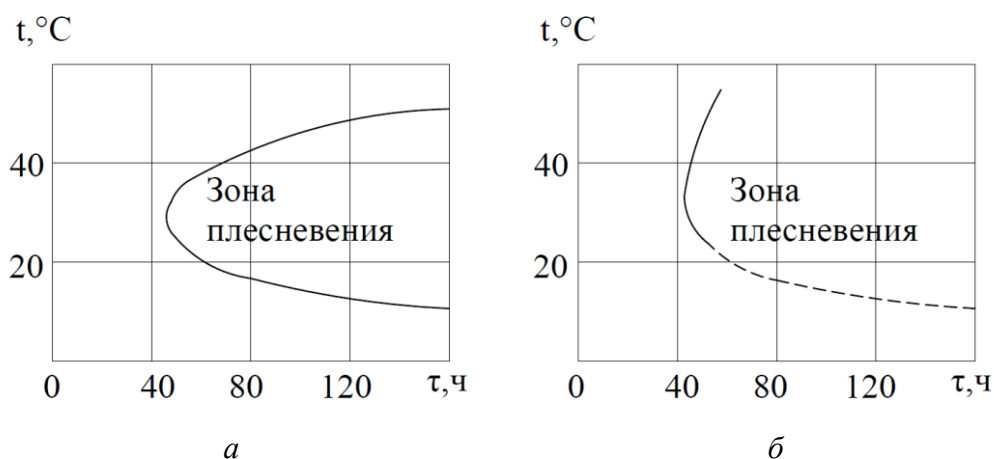


Рис. 2.12. Продолжительность сохранности влажной травы:
 a – по Terry; b – по Lehmann

Технологии заготовки сена с использованием систем *активной вентиляции* для сушки травы имеют следующие преимущества: уменьшение общего времени нахождения травы в поле до 1...3 дней; повышение в 1,7...2,0 раза качества кормов; увеличение технологичности процесса заготовки; сокращение механических потерь на 20...25%. Траву предварительно провяливают в поле до влажности $w_{тр} = 35...45\%$ при заготовке рассыпного сена и до влажности $w_{тр} = 30...35\%$ при заготовке прессованного сена.

Имеется положительный опыт сушки травы с начальной влажностью до 50...60 % неподогретым атмосферным воздухом без ухудшения качества кормов [19, 21, 53, 60, 97]. Перегрев воздуха сокращает время сушки, хотя не всегда сопровождается уменьшением потерь питательных веществ из-за разрушения белков при температуре выше 40...60 °С [58, 77]. По энергетическим причинам искусственный подогрев воздуха не получает распространения [60, 68] или даже сокращается [74]. Наблюдаются значительные колебания удельных расходов воздуха для сушки травы, что связано с недоучетом технологических и технико-экономических аспектов процессов сушки.

Потери питательных веществ при хранении кондиционного сена в хранилищах составляет 1...3 % в год [77], в скирдах – 15...30 % и более [38, 58, 67, 90], уменьшаясь по мере увеличения размеров скирд.

А.В. Лыковым [56] для потоков теплоты и массы в капиллярно-пористом материале предложена система уравнений:

$$\begin{aligned} c_p \rho_o (dt / d\tau) &= \lambda \nabla^2 t + \epsilon r_o \rho_o (du / d\tau); \\ (du / d\tau) &= a_m (\nabla^2 u + \delta_T \nabla^2 t), \end{aligned} \quad (2.41)$$

где $a_m = D$ – коэффициент диффузии влаги; r_o – удельная теплота парообразования; $\delta_T = a_m^T / a_m$ – относительный коэффициент термодиффузии; a_m^T – коэффициент термодиффузии.

Система (2.41) при вынужденной конвекции дополняется внешним тепломассообменом влажного воздуха внутри слоя с поверхностью травы:

$$j = D \rho_o (\nabla u + \delta \nabla t)_{\text{пов}} = \alpha_t (t - t_k) / r. \quad (2.42)$$

Коэффициенты переноса и состояния сред в (2.41) и (2.42) в процессе сушки могут быть определены только экспериментально. Такие исследования для пористых изотропных сред при небольших градиентах температур проведены лишь для ограниченного числа материалов [32] и не затрагивают биологически активные среды. Поэтому применение системы

уравнений (2.41) и (2.42) в практике инженерных расчетов процессов сушки травы не представляется возможным.

Углубление зоны испарения на поверхности сохнувшей травы сопровождается уменьшением значений коэффициента теплоотдачи α_t и скорости сушки. В период постоянной скорости сушки ($N = dw/d\tau = 0$) вся поверхность травы водонасыщена ($u_{\text{пов}} > u_{\text{г}}, p_{\text{нас}} = p_{\text{пов}} > p_{\text{в}}$), и вся теплота, переданная материалу q_1 , идет на испарение влаги. Период продолжается до момента, при котором влагосодержание на всей или части поверхности становится ниже гигроскопического ($u_{\text{пов}} < u_{\text{г}}, p_{\text{нас}} > p_{\text{пов}} > p_{\text{в}}$), на испарение влаги идет часть теплоты q_2 . Общее количество потребной теплоты [56]:

$$q_1 + q_2 = rG_c N(t) [1 + (w - w_p) / w_{\text{тр}}], \quad (2.43)$$

где $N(t)$ – экспериментально определяемая скорость сушки.

Теплота диссипации связанной воды составляет 0,2...0,4 % от теплоты, которую приходится затрачивать на превращение жидкости в пар. При сушке высоковлажных кормов ею можно пренебречь [24].

Общепринятое в настоящее время качественное представление о процессе сушки слоя травы при вынужденной конвекции следующее (рис. 2.13). Трава охлаждается по изоэнтальпе до температуры мокрого термометра $t_{\text{м.т}}$. Зона сушки начинает перемещаться в глубь слоя. В зоне сухого сена его параметры $t_{\text{ск}}$ и $w_{\text{ск}}$ близки к равновесным с входящим в слой воздухом $t_{\text{во}}$ и $\phi_{\text{во}}$, процесс испарения отсутствует. В зоне сушки температура сначала уменьшается до $t_{\text{м.т}}$, а затем, при $\phi_{\text{в}}$ близкой к 100 %, может возрасти до температуры влажной травы $t_{\text{тр}}$. Когда зона сушки начнет выходить за пределы слоя, относительная влажность воздуха $\phi_{\text{в}}$ на выходе из массы сена уменьшается, а его температура соответственно повышается. Чем больше времени зона сушки находится в слое (чем больше отношение $\bar{h} = h_3 / h$), тем экономичнее процесс. Размеры зоны и скорость ее перемещения пропорциональны расходам воздуха L . При влажности травы

$w_{\text{тр}} < w_{\text{г}}$ зона сушки занимает всю толщину рассматриваемого слоя, $\varphi_{\text{в}} < 100\%$. Имеется ряд практических рекомендаций по увеличению влагопоглощающей способности воздуха за счет дыхания травы. Например, в [69] приведено следующее балансовое уравнение:

$$\Delta d_{\text{с}} = d_{\text{к}} - d_{\text{о}} = 10^3 q_{\text{в}} G_{\text{с}} / L_{\text{о}} r \rho_{\text{в}}. \quad (2.44)$$

Данная аналитическая зависимость, как и аналогичная, приведенная в [56], по определению времени сушки типа

$$\tau = \frac{w_{\text{тр}} - w_{\text{р}}}{N} - \frac{1}{\chi_{\text{с}} N} [1 + 2,31 \lg \chi_{\text{с}} (w - w_{\text{р}})] \quad (2.45)$$

не могут удовлетворить запросам практики, так как отсутствуют многофакторные значения скорости сушки травы $N = dw/d\tau$ в периоды постоянных и падающих скоростей сушки и относительного коэффициента $\chi_{\text{с}}$. Наличие биологических тепловыделений еще больше усложняет нахождение времени работы систем активной вентиляции.

Рядом отечественных и зарубежных авторов для получения обобщенной методики расчета интенсивности сушки травы предложено применять $I-d$ -диаграмму влажного воздуха [38, 58, 60, 70, 93]). Предлагаемое ими изменение параметров воздуха в слое травы показано на рис. 2.14. Если бы в процессе сушки полностью отсутствовал испарительный эффект ($t_{\text{во}} = t_1 = \text{const}$), то максимальное влагопоглощение воздуха составило бы $\Delta d_{\text{max}} = d_2 - d_1$ (процесс 1-2). Реальный процесс идет по изоэнтальпе ($I = \text{const}$). При влагосодержании травы выше гигроскопического воздух насыщается влагой до $\varphi \approx 100\%$ (процесс 1-3). В гигроскопической области воздух увлажняется до $\varphi_{\text{р}}$, соответствующей состоянию термодинамического равновесия с травой (процесс 1-4). Дальнейшее повышение влагопоглощающей способности воздуха возможно путем повышения его температуры (процесс 1-5), $\Delta d_{\text{наг}} = d_6 - d_5$ (процесс 5-6).

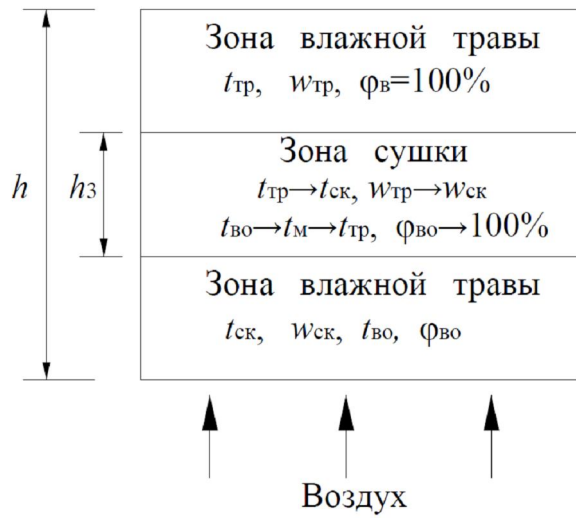


Рис. 2.13. Параметры сена, сохнущей травы и воздуха в насыпи

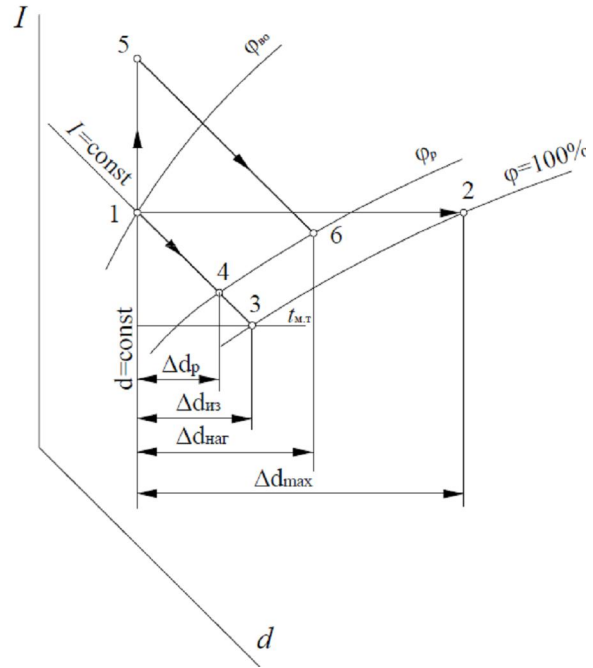


Рис. 2.14. Изменение параметров продуваемого через слой высушиваемой травы воздуха

Масса влаги $G_{вл}$, удаляемой из высушиваемой травы, равна:

$$G_{вл} = G_{тр} (w_{тр} - w_{к}) / (100 - w_{к}) \quad (2.46)$$

или

$$G_{вл} = G_{с} (w_{тр} - w_{к}) / (100 - w_{тр}). \quad (2.47)$$

На I - d -диаграмме находится средняя влагопоглощающая способность воздуха $\Delta d_{ср}$. Количество продуваемого через слой травы воздуха:

$$L_0 = 10^3 G_{вл} / \Delta d_{ср} \rho. \quad (2.48)$$

При производительности вентилятора $L_{в}$, м³/ч, время непрерывной работы систем активной вентиляции составляет $\tau_{в} = L_0 / L_{в}$. Если заранее задано время вентиляции $\tau_{в}$, то производительность системы должна быть не менее $L_{в} = L_0 / \tau_{в}$.

Рассмотренные построения не раскрывают полностью возможности I - d -диаграммы по проектированию и расчету конструктивных и технико-экономических показателей сушки травы. К ним относятся: обоснование

термодинамических процессов обработки приточного воздуха в корректирующем и основном слоях сохнувшей травы; режимы работы систем активной вентиляции в период дождей; использование теплоты дыхания травы для интенсификации процессов сушки.

Таким образом, необходимы дополнительные теоретические и экспериментальные исследования по обоснованию и разработке теплофизической модели тепломассопереноса в слое сохнувшей травы, которая позволит выявить его энергетическую сущность, определить обобщающий потенциал переноса влаги, обосновать и уточнить методику расчета систем активной вентиляции, технико-экономические границы использования искусственного подогрева воздуха или иных способов интенсификации процессов сушки.

Графическое изображение процессов состояния воздуха в биологически активных системах

Проведенные в Нижегородском государственном архитектурно-строительном университете теоретические и экспериментальные исследования процессов тепломассопереноса в насыпях хранящегося сочного растительного сырья и в слоях сохнувшей травы при заготовке грубых кормов позволили разработать теплофизическую модель динамики процессов переноса теплоты и влаги в объемах продукции.

Насыпь сочного растительного сырья. Направления процессов тепло- и массопереноса между поверхностью сырья и охлаждающим воздухом в корректирующем (*I*), основном (*II*) и верхнем (*III*) слоях насыпей показаны на рис. 2.15. Однонаправленность переноса явной и скрытой теплоты – основная особенность процессов в насыпях биологически активной продукции.

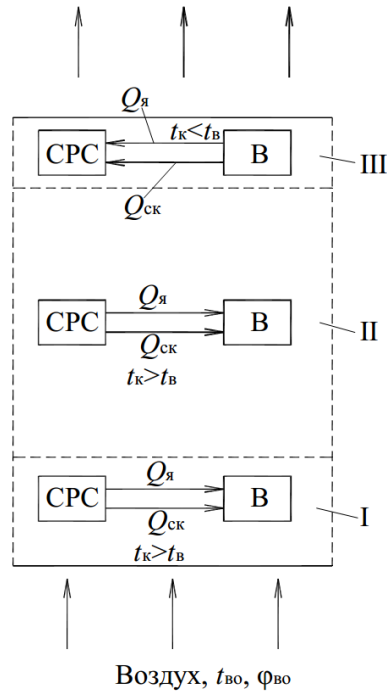


Рис. 2.15. Направления процессов переноса теплоты и влаги в насыпях сочного растительного сырья: *I* – корректирующий; *II* – основной; *III* – верхний

Изменение параметров охлаждающего воздуха на $I-d$ -диаграмме изображено на рис. 2.16. В корректирующем слое воздух увлажняется от $\phi_{во}$ до $\phi_{в} \approx \phi_p$ и одновременно нагревается от $t_{во}$ до температуры нижней части основного слоя $t_{к \min}$ (процесс AB). При низких значениях относительной влажности приточного воздуха $\phi_{во}$ возможен испарительный эффект $\Delta t_{и}$ (процесс FA). Тепловлажностная обработка воздуха в основном слое проходит по $\phi_p = \text{const}$ (процесс BC), эквидистантной соответствующему участку пограничной кривой $\phi = 100\%$. Доказывая невозможность однонаправленного изменения осушающей способности воздуха в направлении его движения в насыпи (отклонения процесса BC от $\phi_p = \text{const}$), профессор В.З. Жадан пишет [6, стр. 67...68]: «...возникает физически необъяснимое противоречие между приращением влагосодержания воздуха (его осушающей способностью) и причиной, вызывающей это явление (дефицитом влагосодержания воздуха): большему приращению влагосодержания воздуха будет отвечать малый дефицит влагосодержания и наоборот, что быть не может».

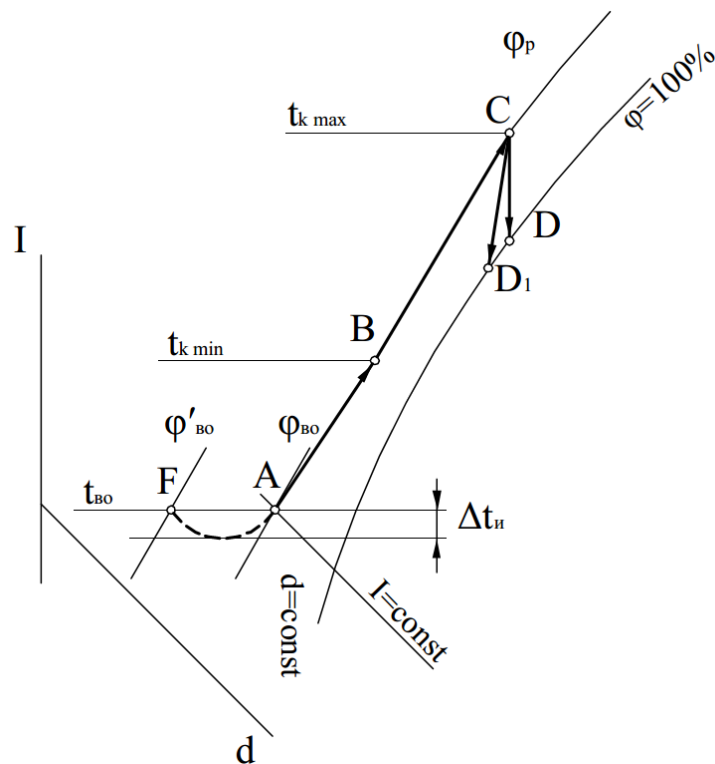


Рис. 2.16. Изменение состояния охлаждающего воздуха в насыпи:
AB (FAB) – в корректирующем слое; *BC* – в основном слое; *CD (CD₁)* – в верхнем слое

Воздух удаляется из насыпи с параметрами точки *C* ($t_{k \max}$, ϕ_p). Проходя через более холодный верхний слой *III* (рис. 2.15), влажный воздух может охладиться до состояния насыщения (процесс *CD*) или выпадения конденсата (процесс *CD₁*).

Слой сохнувшей травы. Дыхание травы и развитие микроорганизмов вызывают самосогревание массы. Процесс сушки неподогретым атмосферным воздухом характеризуется температурным режимом $t_k > t_{во}$.

Первый по ходу движения воздуха слой травы, по аналогии с насыпью хранящейся продукции, называется корректирующим (*I*, рис. 2.17). Начальная влажность травы выше гигроскопической ($w_{тр} > w_{г}$), испарение идет как с открытой поверхности воды. Воздух увлажняется по изоэнтальпии *AG* до равновесной относительной влажности ϕ_p (рис. 2.18). Биологические тепловыделения нарушают адиабатность процесса, смещая луч насыщения воздуха от линии $I = \text{const}$ (процесс *AB*). Увеличение ассимилирующей способности воздуха Δd_d пропорционально эквивалентному по-

догреву воздуха на $\Delta t_{\text{в.о}}$ (процесс AA_1B), что может быть выражено балансовым уравнением:

$$G_{\text{к}}(c_{\text{тр}}\Delta t_{\text{в.о}} + q_{\text{в}}) = \Delta d_{\text{д}} L_{\text{в}} \rho_{\text{в}} r, \quad (2.49)$$

где $G_{\text{к}}$ – масса корректирующего слоя растительного сырья.

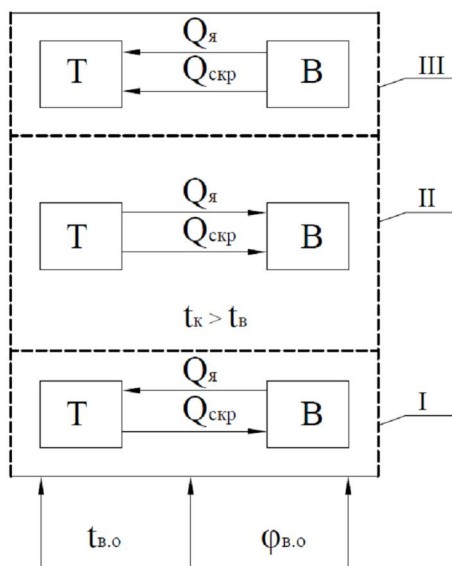


Рис. 2.17. Направления тепло- и массопереноса в слое сохнущей травы при $t_{\text{к}} > t_{\text{в}}$:
 I – слой активно сохнущей травы (корректирующий);
 II – основной слой; III – поверхностный слой

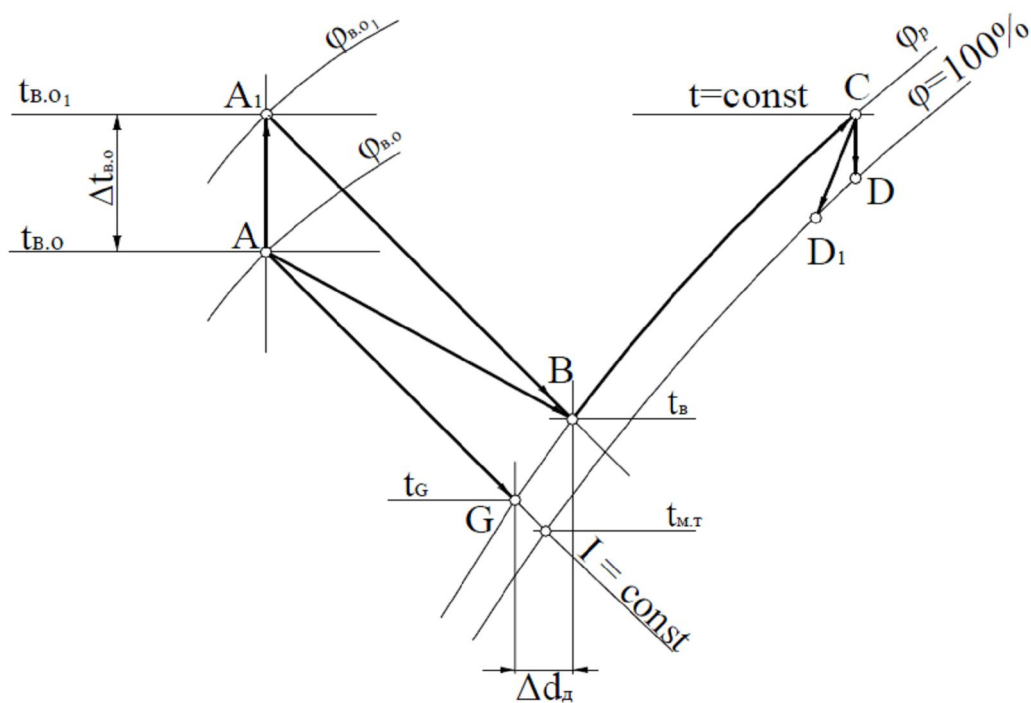


Рис. 2.18. Изображение на $I-d$ -диаграмме изменения состояния воздуха в слое сохнущей травы при $t_{\text{к}} > t_{\text{в.о}}$

В процессе сушки слой активно сохнущей травы (корректирующий) продвигается по направлению движения воздуха. Интенсивность теплоотдачи подсушенной массы снижается из-за углубления зоны испарения. Момент наступления гигроскопического равновесия определяется изотермами сорбции-десорбции (рис. 1.1, 1.2, 1.3, 1.4).

Для анализа процессов состояния воздуха в слое активно сохнущей травы (*II*, рис. 2.17) с $w_{\text{тр}} \leq w_{\text{г}}$ разобьем его на несколько зон по направлению движения воздуха (рис. 2.19*а*). Предполагаем, что изменение теплофизических свойств травы происходит скачкообразно в центре каждой зоны, снятие физической теплоты – равномерное. Нулевую зону воздух проходит с постоянными параметрами (т. *A*, рис. 2.19*б*), в первой зоне он охлаждается и увлажняется до $\varphi_{\text{р1}}$ (процесс *A11'*), во второй – до $\varphi_{\text{р2}}$ (процесс *A22'*), в третьей – до $\varphi_{\text{р3}}$ (процесс *A33'*) и в четвертой – до $\varphi_{\text{р}}$ (процесс *AGB*). Действительный результирующий процесс во всем слое в связи с равномерностью изменения теплофизических свойств сохнущей травы от $w_{\text{к}}$ до $w_{\text{г}}$, идет по лучу *AB*.

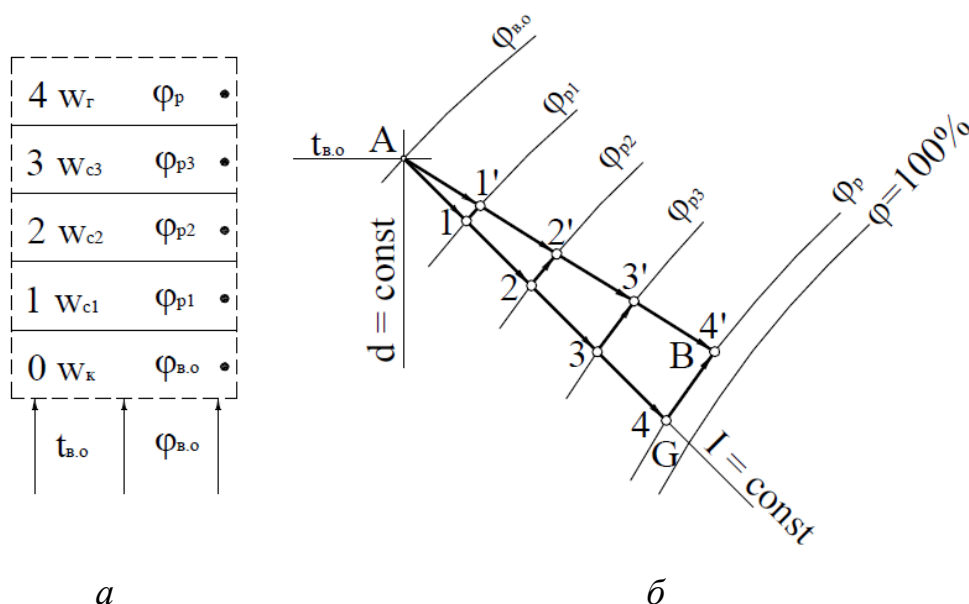


Рис. 2.19. Изменение состояния воздуха в слое травы при $w_{\text{тр}} \leq w_{\text{г}}$: *a* – деление слоя по зонам; *б* – изображение процессов на *I-d*-диаграмме

Известные работы по влагообмену в основном слое сохнущей травы, имеющей $w_{тр} > w_{г}$, основаны на психрометрической теории: изотермичность процессов; возможность достижения фильтрующимся воздухом значений $\varphi_p = 100\%$, при которых отсутствует влагообмен между ним и травой [24, 58, 69, 70]. Однако такой подход не учитывает биологическую природу травы. Покажем качественное несоответствие психрометрической теории реальным процессам.

Воздух с параметрами точки a (рис. 2.20), ассимилируя влагу, уменьшает свою осушающую способность до нуля (гипотетический процесс ac). Биологические тепловыделения одновременно нагревают воздух (гипотетический процесс ab), повышая его осушающую способность на $\Delta d = d_c - d_a$. Результирующий процесс aa' , дает значение относительной влажности воздуха на рассмотренном участке $I-d$ -диаграммы. Дальнейшие аналогичные построения позволяют найти всю линию $aa'a'' \dots a^n$, представляющую кривую относительной влажности $\varphi_p = \text{const}$, эквидистантную $\varphi = 100\%$.

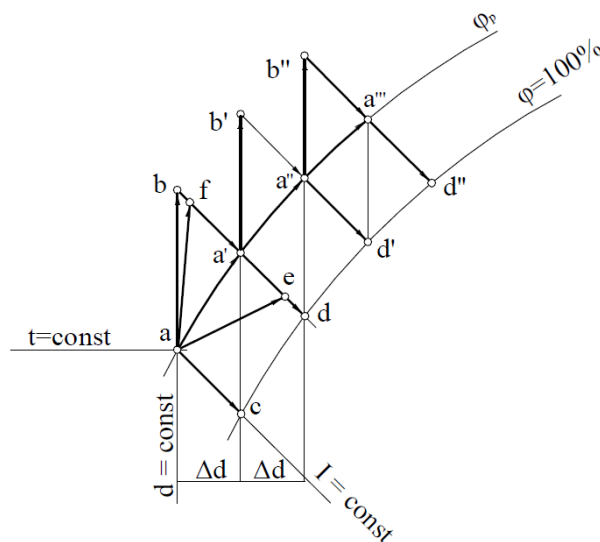


Рис. 2.20. Изменение состояния воздуха в основном слое сохнущей травы

Равновесная относительная влажность воздуха при ассимиляции им влаги не может достигать или приближаться к линии $\varphi = 100\%$. Биологические тепловыделения постоянно уменьшают величину относительной

влажности. С другой стороны, если по какой-либо причине первоначальный дефицит влажности воздуха (Δd) увеличится, то величина φ_p отклонится влево, что повлечет за собой увеличение интенсивности испарения, благодаря чему гигроскопическое равновесие восстановится, процесс вернется на линию $\varphi_p = \text{const}$. Гипотетические процессы af и ae противоречат физической сущности динамики теплообмена в основном слое сохнувшей травы.

Вышесказанное представлено в виде процесса BC на рис. 2.18, показывающего, что в основном слое сохнувшего биологического материала ассимиляция влаги воздухом происходит даже при $\varphi_p \rightarrow 100\%$. Количественно интенсивность испарения влаги в основном слое сохнувшей травы (рис. 2.18) характеризуется величиной $(d_c - d_b)$.

Предварительный искусственный подогрев вентиляционного воздуха на Δt (рис. 2.21) принципиально не меняет направления процессов теплообмена в слое ($t_{\text{во}} > t_{\text{к}}$). Биологические тепловыделения отклоняют процесс от изоэнтальпы на величину $\Delta t_{\text{во}}$. Особенность процесса сушки нагретым воздухом заключается в том, что корректирующий слой при больших значениях Δt может занимать весь слой травы. Этот случай наблюдается, когда продуваемый воздух не успевает охладиться до температуры травы ($t_{\text{в1}} > t_{\text{к}}$, $\varphi_{\text{р1}} < \varphi_{\text{р}}$), и он не полностью использует свою влагопоглощающую способность ($\Delta d_{\text{в1}} < \Delta d_{\text{в}}$). В поверхностном слое возможно выпадение конденсата в соответствии с направлением луча B_1D . Если же основной слой формируется, то процесс идет по направлению ABC и далее в поверхностном слое по CD_1 или CD_2 .

Принципиальными различиями сушки единичных растений и в слоях (корректирующем и основном) при продувке массы травы воздухом являются: в первом случае потоки теплоты и влаги направлены в противоположные стороны, во втором – сопровождается одинаковым направлением этих потоков.

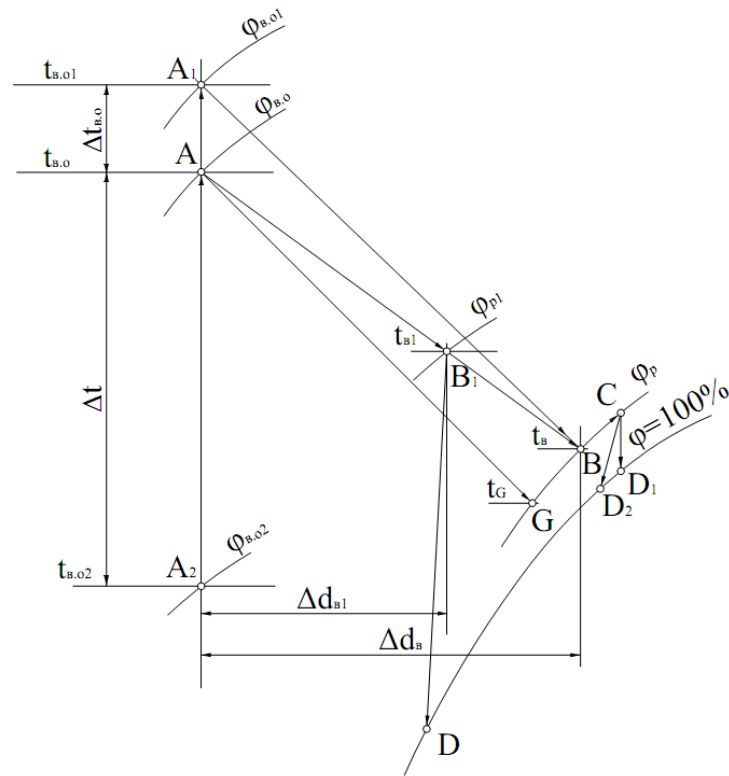


Рис. 2.21. Изменение параметров нагретого воздуха в слое сохнущей травы

Обезвоживание единичных частиц в открытом воздухе обусловлено переносом энергии и влаги теплопроводностью и диффузией; в корректирующем слое характеризуется конвективным теплопереносом при определяющей роли испарительного эффекта; в основном слое воздух одновременно подогревается и увлажняется, процесс подчиняется закономерности формирования параметров микроклимата в слое биологически активной продукции – саморегулированию относительной влажности воздуха.

Термодинамическое обоснование потенциала влажности при расчетах интенсивности влагообмена в биологически активных системах

Общий подход к использованию понятия потенциала влажности

Как уже отмечалось выше, конечные цели хранения сочного растительного сырья и сушки травы принципиально разные: в первом случае

необходима максимальная сохранность влаги в сырье; во втором – создание условий для интенсификации процессов влагоотдачи.

Также была показана неприемлемость применения психрометрической теории влагообмена, согласно которой вся явная теплота, подводимая к продукту, расходуется на испарение влаги:

$$W = Q / r, \quad (2.50)$$

где $r = 2500 - 2,29t$.

Количественное обоснование потерь влаги в основном слое сочного растительного сырья в неизотермических условиях подчиняется обобщенной зависимости (2.18). Однако ни она, ни ее запись в виде

$$W = Q / \varepsilon_t = B(1 - \varphi_p) = \text{const} \quad (2.51)$$

не позволяют выявить движущую силу (разность потенциалов) влагопереноса в неизотермических условиях. Разность относительных влажностей воздуха в этих условиях не является движущей силой переноса и не имеет самостоятельного влияния на потери влаги продукцией [18, 42, 85, 86].

Современные разработки вопросов определения потенциалов переноса влаги показывают, что обобщающей движущей силой взаимосвязанного тепломассообмена в нестационарных условиях является разность полных термодинамических потенциалов фаз $\Delta\theta$ [11, 12, 13, 18, 19, 30]. В пределах температур охлаждения и хранения растительного сырья определение значения потенциала влажности воздуха аппроксимируется зависимостью типа [12]:

$$\theta = a + bt + c\varphi + du + eq_{\text{л}}, \quad (2.52)$$

где a, b, c, d, e – коэффициенты.

Пренебрегая лучистым теплообменом ($q_{\text{л}} = 0$) и влиянием подвижности воздуха на влагообмен (u), разность потенциалов влажности поверхности продукции и влажного воздуха равна:

$$\Delta\theta_{\text{к}} = b(t_{\text{пов}} - t_{\text{в}}) + c(\varphi_{\text{пов}} - \varphi_{\text{в}}). \quad (2.53)$$

Зависимость (2.53) характерна для корректирующего слоя насыпи, в котором охлаждающий воздух одновременно увлажняется (от начальной относительной влажности $\varphi_{\text{во}}$ до $\varphi_{\text{в}} = \varphi_{\text{р}}$ в основном слое насыпи) и нагревается (охлаждается), соответственно, от $t_{\text{во}}$ до $t_{\text{в}} \approx t_{\text{пов}}$. Значения разностей потенциалов влажности в корректирующем слое являются функцией двух величин: Δt и $\Delta \varphi$.

При хранении сочного растительного сырья на его поверхности отсутствует углубление зоны испарения, относительная влажность воздуха у поверхности $\varphi_{\text{пов}} \approx 100\%$ (упругость водяного пара соответствует насыщающей при температуре продукта). Саморегулируемость и постоянство по высоте основного слоя насыпи значений $\varphi_{\text{в}} \approx \varphi_{\text{р}}$ экспериментально доказана многими исследованиями [17, 18, 28, 42, 43, 84]. Наличие и равенство разностей локальных значений ($\varphi_{\text{пов}} - \varphi_{\text{в}}$) по всей высоте основного слоя насыпи в направлении движения охлаждающего воздуха является доминирующим фактором при определении величины разности потенциалов влажности $\Delta \theta_{\text{к}}$.

Экспериментально разность температур поверхности сырья и воздуха в основном слое ($t_{\text{пов}} - t_{\text{в}}$) количественно не фиксируется, так как составляет не более 0,05...0,10 °С [17, 43, 80]. Из-за невозможности надежной экспериментальной фиксации значений ($t_{\text{пов}} - t_{\text{в}}$) в основном слое сочного растительного сырья к этой разности температур нельзя относить полученные в опытах величины разностей потенциалов влажности $\Delta \theta_{\text{к}}$ и анализировать динамику изменения последних. В то же время учтем, что именно наличие локальных разностей температур между поверхностью биологически активной продукции и воздухом по высоте слоя, вызванных явными тепловыделениями сырья, не позволяют воздуху в насыпи достичь полного насыщения, влагообмен продолжается даже при $\varphi_{\text{в}} = 100\%$.

Практическое равенство локальных значений температур компонентов сред ($t_{\text{пов}} \approx t_{\text{в}}$) и наличие постоянных разностей относительных влажно-

стей воздуха у поверхности продукции и вне ее ($\Delta\varphi_{\text{пов-в}} = \varphi_{\text{пов}} - \varphi_{\text{в}} (\varphi_{\text{р}}) = \text{const}$) в основном слое сочного растительного сырья позволяет при расчете и анализе процессов переноса влаги между поверхностью хранящегося сырья и влажным воздухом характеризовать их интенсивность только одной величиной:

$$\Delta\theta_{\text{к}} = c(\varphi_{\text{пов}} - \varphi_{\text{в}}). \quad (2.54)$$

Таким образом, в основном слое сочного растительного сырья движущая сила влагообмена выражается через разность относительных влажностей воздуха у поверхности продукции и в насыпи [16]. Экспериментальные исследования естественной убыли в основных слоях насыпей показали, что в направлении движения воздуха локальные усушки остаются практически постоянными $W = j_{\theta}$ [17, 43]. Совместный анализ (2.54), (2.16) и вышеприведенного экспериментального факта дает возможность сделать вывод о постоянстве разности потенциалов переноса влаги по высоте основных слоев насыпей каждого вида хранящейся продукции, то есть о постоянстве разности потенциалов влажности ($\Delta\theta_{\text{к}} = \text{const}$).

Потенциал влажности воздуха (наружного $\theta_{\text{н}}$ и внутреннего $\theta_{\text{в}}$) определяется при различных температурах по зависимостям [12]:

$$\theta = -3,81 + 0,195t + 0,164\varphi - 0,0027q_{\text{р}} - 0,035v \quad t \leq -20 \text{ }^{\circ}\text{C}; \quad (2.55)$$

$$\theta = 6,027 + 0,227t + 0,046\varphi - 0,00143q_{\text{р}} - 0,0483v \quad -20 \leq t \leq -10 \text{ }^{\circ}\text{C}; \quad (2.56)$$

$$\theta = 2,86 + 0,219t + 0,0965\varphi - 0,00349q_{\text{р}} - 0,0081v \quad -10 \leq t \leq 0 \text{ }^{\circ}\text{C}; \quad (2.57)$$

$$\theta = -4,01 + 0,448t + 0,169\varphi - 0,00468q_{\text{р}} - 0,0165v \quad 0 \leq t \leq 10 \text{ }^{\circ}\text{C}; \quad (2.58)$$

$$\theta = -13,6 + 1,22t + 0,204\varphi - 0,0026q_{\text{р}} + 0,022v \quad 10 \leq t \leq 20 \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad (2.59)$$

где $q_{\text{р}}$ – интенсивность солнечной радиации; в (2.55...2.59) размерность $q_{\text{р}}$ ккал/(м²ч); v – подвижность воздуха, м/с.

Интенсивность потока влаги между продукцией и воздухом определяется разностью потенциалов влажности элементов системы:

$$j_{\theta} = \alpha_{\theta}(\theta_{\text{пов}} - \theta_{\text{в}}) = \alpha_{\theta}\Delta\theta_{\text{к}}. \quad (2.60)$$

Преобразуем (2.60) для условий тепломассообмена в основном слое насыпи биологически активной продукции ($\varphi_{\text{пов}} - \varphi_{\text{в}} (\varphi_{\text{р}}) = \Delta\varphi_{\text{пов-в}} = \text{const}$, однонаправленность тепловых и влажностных потоков от продукции к воздуху). Коэффициент влагообмена представим в виде $\alpha_{\theta} = b_1\alpha_{tv}$ ($b_1 = \text{const}$ – коэффициент пропорциональности; коэффициент теплообмена α_{tv} включает в себя как перенос явной, так и скрытой теплоты). Приняв линейное изменение относительной влажности воздуха от изменения температуры в диапазоне $t_{\text{в}} = -1 \dots 5$ °С и $\varphi_{\text{в}} \geq 90$ % (погрешность до 3 %), проведем замену значения $\Delta\varphi_{\text{пов-в}}$ в формуле (2.54) на $\Delta t_{\text{пов-в}}$. Установившаяся конечная разность температур $\Delta t_{\text{пов-в}} = t_{\text{к}}(x, \infty) - t_{\text{в}}(x, \infty)$ продукции и воздуха в основном слое хранящейся продукции постоянна [17]:

$$\Delta t_{\text{пов-в}} = q_v / \alpha_{tv} \approx 0,05 \text{ °С} = \text{const}. \quad (2.61)$$

После замены имеем:

$$\Delta\theta_{\text{к}} = c(\varphi_{\text{пов}} - \varphi_{\text{в}}) \approx b_2(t_{\text{пов}} - t_{\text{в}}) = b_2q_v / \alpha_{tv}, \quad (2.62)$$

где $b_2 = \text{const}$ – коэффициент пропорциональности.

В результате подстановки значений α_{θ} и $\Delta\theta_{\text{к}}$ в (2.60) получим:

$$j_{\theta} = \alpha_{\theta}\Delta\theta_{\text{к}} = b_1\alpha_{tv}b_2q_v / \alpha_{tv} = b_3q_v, \quad (2.63)$$

где $b_3 = b_1b_2$ – коэффициент пропорциональности.

Зависимость (2.63) показывает, что потери влаги в основном слое насыпи пропорциональны интенсивности удельных биологических тепловыделений. Она подтверждает физическую достоверность зависимости (2.18), полученной при более общем подходе к нахождению потенциалов тепло- и массопереноса.

Приравнивая значения потоков влаги по (2.60) и (2.18), получим:

$$\alpha_{\theta}\Delta\theta_{\text{к}} = q_v / \varepsilon_t. \quad (2.64)$$

Показанное выше постоянство величин q_v / ε_t и $\Delta\theta_{\text{к}}$ по высоте основного слоя насыпей влечет за собой постоянство коэффициента влагообмена α_{θ} при стационарном режиме охлаждения продукции.

Методика расчета потерь влаги сочного растительного сырья на основе потенциала влажности

Потенциалы влажности воздуха у поверхности сочного растительного сырья $\theta_{\text{пов}}$ и в объеме насыпи $\theta_{\text{в}}$ в диапазоне температур $t = 0 \dots 10$ °С определяются по (2.58). Величина $\Delta\theta_{\text{к}} = \theta_{\text{пов}} - \theta_{\text{в}}$ с учетом принятой теплофизической модели равна:

$$\Delta\theta_{\text{к}} = 0,048(t_{\text{пов}} - t_{\text{в}}) + 0,169(\varphi_{\text{пов}} - \varphi_{\text{в}}). \quad (2.65)$$

Основной слой насыпи. При расчете значений $\Delta\theta_{\text{к}}$ в основном слое насыпей сочного растительного сырья перенос влаги за счет разности температур воздуха у поверхности и в объеме слоя не учитывается.

Оптимальными условиями хранения картофеля являются $t_{\text{в}} = 2 \dots 4$ °С, $\varphi_{\text{в}} = 90 \dots 95$ %. Для этих условий, согласно (2.65), величины разностей потенциалов влажности при различных вариациях температур и относительных влажностей воздуха равны:

$$\Delta\theta_{\text{к}} = \theta_{\text{пов}}(4 \text{ °С}, 100 \text{ \%}) - \theta_{\text{в}}(4 \text{ °С}, 95 \text{ \%}) = 0,845 \text{ °В}; \quad (2.66)$$

$$\Delta\theta_{\text{к}} = \theta_{\text{пов}}(2 \text{ °С}, 100 \text{ \%}) - \theta_{\text{в}}(2 \text{ °С}, 95 \text{ \%}) = 0,845 \text{ °В};$$

$$\Delta\theta_{\text{к}} = \theta_{\text{пов}}(4 \text{ °С}, 100 \text{ \%}) - \theta_{\text{в}}(4 \text{ °С}, 90 \text{ \%}) = 1,69 \text{ °В}.$$

Оптимальные условия хранения моркови и свеклы столовой составляют $t_{\text{в}} = 0 \dots 1$ °С, $\varphi_{\text{в}} = 90 \dots 95$ %. Для них при $(\varphi_{\text{пов}} - \varphi_{\text{в}}) = 10$ % $\Delta\theta_{\text{к}} = 1,69$ °В, при $\Delta\varphi = 5$ % $\Delta\theta_{\text{к}} = 0,845$ °В. Повышение $\varphi_{\text{в}}$ в насыпи капусты до 97 % снижает величину $\Delta\theta_{\text{к}}$ до $0,169(100 - 97) = 0,507$ °В.

При иных рекомендуемых или реально наблюдаемых значениях температур хранения сочного растительного сырья величины разностей потенциалов влажности $\Delta\theta_{\text{к}}$ определяются по (2.65).

Стационарный режим тепло- и массопереноса характеризуется постоянством коэффициента влагообмена α_{θ} . Конкретные значения α_{θ} , определенные по (2.64), сведены в табл. 2.2.

Т а б л и ц а 2.2

Расчетные значения коэффициента α_θ

| Продукт | $t_{ср}$, °С | φ_p , % | $\varepsilon_i \cdot 10^3$, кДж/г | q_v , кДж/(м ³ ч) | W , г/(м ³ ч) | $\Delta\theta_k$, °В | α_θ , г/(м ³ ч°В) | $\alpha_{\theta m}$, г/(т ч°В) |
|-----------|------------------|--------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|--------------------------|---------------------------------------------|------------------------------------|
| Картофель | 3 | 95 | 5944 | 43,5 | 7,32 | 0,845 | 8,66 | 12,37 |
| Капуста | 0 | 97 | 6385 | 15,4 | 2,41 | 0,507 | 4,75 | 11,60 |
| Свекла | 0,5 | 95 | 6312 | 22,2 | 3,19 | 0,845 | 3,78 | 6,10 |
| Морковь | 0,5 | 95 | 6312 | 30,6 | 3,73 | 0,845 | 4,41 | 7,10 |

Приведенные в табл. 2.2 расчетные значения коэффициентов массоотдачи α_θ и $\alpha_{\theta m}$ следует считать осредненными для каждого вида сочного растительного сырья. Коэффициент α_θ показывает значения количества влаги, испаряющейся с поверхности 1 м³ насыпи в течение одного часа при разности потенциалов влажности 1 °В, $\alpha_{\theta m}$ – то же с поверхности 1 т продукции.

Корректирующий слой насыпи. По высоте корректирующегося слоя насыпи происходит выравнивание температур воздуха и продукции, относительная влажность воздуха повышается от входящей в насыпь $\varphi_{во}$ до равновесной φ_p . Из-за непостоянства значений относительной влажности воздуха в корректирующем слое, следствием чего является непостоянство локальных величин тепловлажностного отношения ε_i , зависимость $W = Q/\varepsilon_i$ не может быть принята к расчету потерь влаги. Принятие за основу расчета потерь влаги разности потенциалов влажности $\Delta\theta_k$ устраняет данный недостаток и позволяет учесть все основные факторы, определяющие усушку продукции в корректирующем слое. Значения $\Delta\theta_k$ вычисляются по (2.65).

Практически полное отсутствие в цикле *естественной конвекции* (ЕК) подвижности воздуха ($u \ll 0,01$ м/с) позволяет пренебречь в расчетах дополнительными потерями влаги в корректирующем слое, считать по всей высоте насыпи $t_{пов} \approx t_B$, $\varphi_{пов} \approx \varphi_p$. Поэтому разность потенциалов влажности $\Delta\theta_k$ в цикле ЕК для всей насыпи определяется по (2.66). При на-

личии иных конкретных параметров сред ($t_{\text{пов}} \neq t_{\text{в}}$) необходимо пользоваться зависимостями вида (2.65), находя для каждого случая $\theta_{\text{пов}} = f(t_{\text{пов}}, \varphi_{\text{пов}})$ и $\theta_{\text{в}} = f(t_{\text{в}}, \varphi_{\text{в}})$.

В цикле ЕК (2.65) имеет вид:

$$\Delta\theta_{\text{к}}^{\text{ЕК}} = 0,169(100 - \varphi_{\text{р}}). \quad (2.67)$$

Доля цикла ЕК в течение суток составляет [18]:

$$K_{\text{в}}^{\text{ЕК}} = (1 - K_{\text{в}}) = (24 - \tau) / 24, \quad (2.68)$$

где τ – время работы систем активной вентиляции, ч/сут.

В течение цикла *вынужденной конвекции* (ВК) длительностью $K_{\text{в}} = \tau / 24$ температура поверхности сочного растительного сырья $t_{\text{пов}}$ переменна по высоте корректирующего слоя и меняется в общем случае от $t_{\text{к1}}$ в верхней части до $t_{\text{к min}}$ в нижней части слоя (рис 2.22). Максимальное значение $t_{\text{к1}}$ имеет место в конце цикла ЕК: $t_{\text{к1}} = t_{\text{к max}} - \Delta t_{\text{к}}$. Величина градиента температуры по высоте h основного слоя насыпи Δt для картофеля и свеклы столовой [18]:

$$\text{– для картофеля и свеклы столовой} \quad \Delta t_{\text{к}} \cong 0,65\sqrt{q_{\text{в}}h}; \quad (2.69)$$

$$\text{– для насыпи белокочанной капусты} \quad \Delta t_{\text{к}} \cong 0,55\sqrt{q_{\text{в}}h}. \quad (2.70)$$

Минимальная температура в верху корректирующего слоя наблюдается в конце цикла ВК: $t_{\text{к1}}^{\text{ВК}} = t_{\text{к1}}^{\text{ЕК}} - \Delta t_{\text{к1}}^{\text{ВК}}$. Значение $\Delta t_{\text{к1}}^{\text{ВК}}$ для насыпи клубней определяется из соотношения [18]:

$$\Delta t_{\text{к}} / \Delta\tau = -0,49 \cdot 10^{-3} bL, \quad (2.71)$$

где b – градиент температуры по высоте насыпи, °С/м.

Температура поверхности нижних слоев корректирующего слоя в цикле ВК понижается от $t_{\text{к0}}^{\text{ЕК}} = (t_{\text{к max}} - \Delta t'_{\text{к}})$ до $t_{\text{к min}}$, минимальной для хранения конкретного вида сырья. Значение $\Delta t'_{\text{к}}$ находится для всей высоты насыпи h .

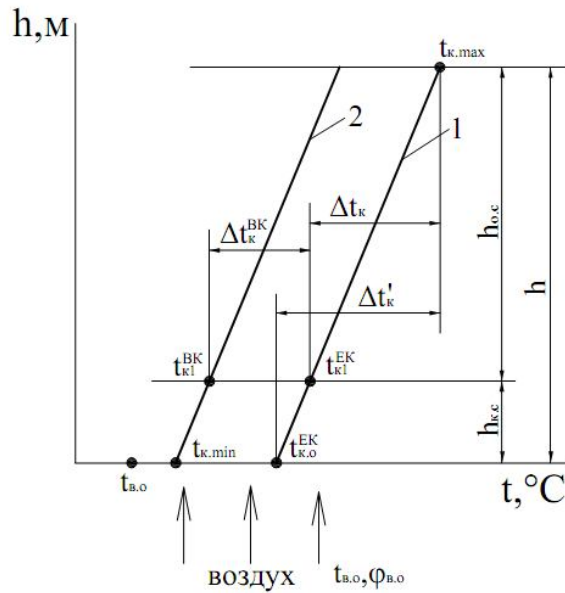


Рис. 2.22. К определению $\Delta\theta_k$ в корректирующем слое насыпи:
 1 и 2 – соответственно, начальное и конечное распределение температур

Средняя температура за цикл ВК в верхнем и нижнем слоях корректирующего слоя: $\Delta t_{к1}^{cp} = t_{к\max} - \Delta t_k - 0,5\Delta t_k^{BK}$, $t_{к0}^{cp} = 0,5(t_{к\max} + t_{к\min} - \Delta t_k')$.
 Средняя температура поверхности продукции в корректирующем слое за цикл ВК находится как среднеарифметическая величина между $t_{к1}^{cp}$ и $t_{к0}^{cp}$:

$$t_{кк}^{cp} = 0,75t_{к\max} + 0,25(t_{к\min} - \Delta t_k^{BK} - \Delta t_k') - 0,5\Delta t_k. \quad (2.72)$$

Температура воздуха в корректирующем слое в цикле ВК повышается по ходу движения от входящей $t_{во}$ до $t_{к1}^{cp}$. Тогда его средняя температура во всем слое составит:

$$t_{вк}^{cp} = (t_{во} + t_{к\max} - \Delta t_k - 0,5\Delta t_k^{BK}) / 2. \quad (2.73)$$

Средняя разность температур поверхности продукции и воздуха в корректирующем слое за цикл ВК определяется при вычитании из (2.72) величины (2.73):

$$\Delta t_{кк}^{BK} = 0,25(t_{к\max} + t_{к\min} - \Delta t_k') - 0,5\Delta t_{во}. \quad (2.74)$$

Приняв в первом приближении линейное изменение относительной влажности воздуха в корректирующем слое, средний ее дефицит в слое составит:

$$\Delta\varphi_{в\text{ кс}} = 100 - (\varphi_{во} + \varphi_p) / 2. \quad (2.75)$$

Общий объем насыпи сочного растительного сырья $V_{об}$ включает объемы основного $V_{ос}$ и корректирующего $V_{кс}$ слоев: $V_{об} = V_{ос} + V_{кс}$.

Совместное решение (2.63), (2.67) и (2.68) дает величину теряемой продукцией влаги в период цикла ЕК:

$$j_{\theta}^{ЕК} = 0,169\alpha_{\theta}V_{об}(100 - \varphi_p)(1 - K_{в})24. \quad (2.76)$$

В период цикла ВК потери влаги в основном и корректирующем слоях равны:

$$j_{\theta\text{ ос}}^{ВК} = 0,169\alpha_{\theta}V_{ос}(100 - \varphi_p)K_{в}24; \quad (2.77)$$

$$j_{\theta\text{ кс}}^{ВК} = \alpha_{\theta}V_{кс}(0,448\Delta t_{кс}^{ВК} + 0,169\Delta\varphi_{в\text{ кс}})K_{в}24. \quad (2.78)$$

Суммированием потерь по (2.76)...(2.78) определяется общая усушка сочного растительного сырья в течение суток:

$$j_{\theta\text{ об}} = j_{\theta}^{ЕК} + j_{\theta\text{ ос}}^{ВК} + j_{\theta\text{ кс}}^{ВК}. \quad (2.79)$$

Принятие допущений о линейности изменения температуры поверхности продукции, температуры и относительной влажности по высоте корректирующего слоя, о постоянстве высоты последнего ($h_{кс} = \text{const}$) могут привести к погрешности в определении $j_{\theta\text{ кс}}^{ВК}$ по (2.78) до 20 %. Однако корректирующий слой занимает до 15 % от объема насыпи. Поэтому погрешность в определении общих потерь $j_{\theta\text{ об}}$ по (2.79) из-за вышеперечисленных допущений не превышает 5...8 %.

На рис. 2.23 приведены рассчитанные значения разностей потенциалов влажности в корректирующем слое картофеля (член в скобках в формуле 2.78) от относительной влажности приточного воздуха $\varphi_{во}$ при

$t_{к\max} = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{к\min} = 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{в0} = 0,0; 0,5; 1,0$ и $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ для насыпей высотой $h = 3,0$ м и $q_v = 12\text{ Вт/м}^3 = 17\text{ Вт/т}$. Аналогичные данные для корректирующего слоя насыпи кочанов капусты при $t_{в0} = -2,0, -1,5$ и $-1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$; $h = 2,0$ м, $q_v = 4,2\text{ Вт/м}^3 \approx 11\text{ Вт/т}$, $t_{к\max} = 1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{к\min} = -1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ показаны на рис. 2.24.

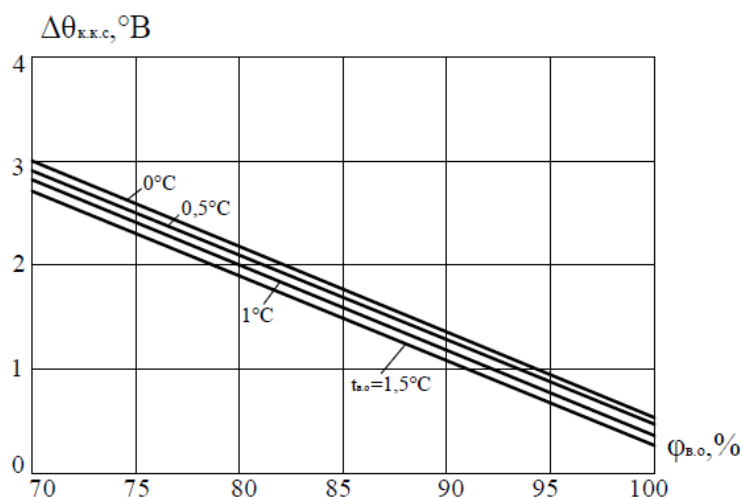


Рис. 2.23. Зависимость $\Delta\theta_{ккс}$ от начальных параметров воздуха в корректирующем слое насыпи клубней

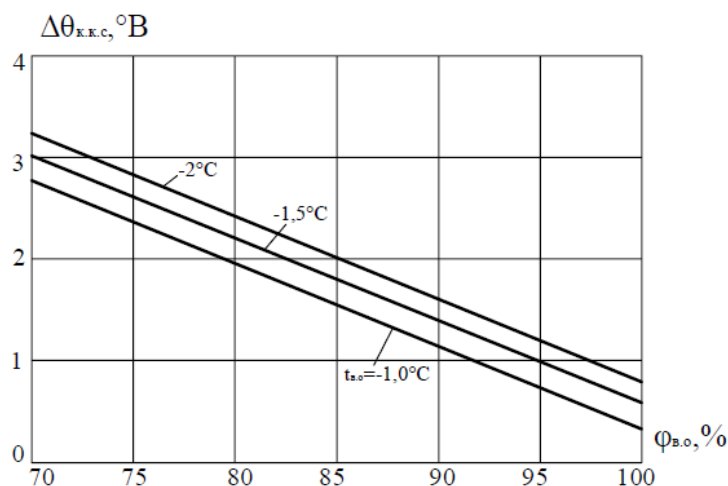


Рис. 2.24. Зависимость $\Delta\theta_{ккс}$ от начальных параметров воздуха в корректирующем слое насыпи белокочанной капусты

Обобщенная методика расчета потерь влаги сочным растительным сырьем на основе потенциала влажности применима при любом варьировании как температуры приточного воздуха, так и температурно-влажностных условий хранения.

Пример расчета потерь влаги картофелем на основе теории потенциала влажности.

Исходные данные. Картофелехранилище емкостью $G_p = 1000$ т, высота насыпи $h = 3,0$ м, удельный расход воздуха $L_v = 60$ м³/(м³ ч), равновесная относительная влажность воздуха $\varphi_p = 97,5$ %, температура приточного воздуха $t_{в,о} = 1,0$ °С. В основной период хранения коэффициент использования вентиляции $K_v = 0,16$ ($\Delta\tau_v \approx 3,5 \dots 4,0$ ч/сут.). Продолжительность цикла естественной конвекции (2.68) $K_v^{EK} = 1 - K_v = (24 - \Delta\tau_v)/24 = 0,84$, $\Delta\tau_v^{EK} \approx 20$ ч.

Расчет потерь влаги, теряемой насыпью клубней в период EK, находится по (2.76): $j_{\theta}^{EK} = 0,169 \cdot \alpha_{\theta} \cdot V_{об} \cdot (100 - \varphi_p) \cdot (1 - K_v) \cdot 24$.

Коэффициент $\alpha_{\theta} = 8,66$ г / (м³ ч °В) принят согласно табл. 2.2. Общий объем насыпи $V_{об} = G_p / \rho_n = 1000 / 0,68 = 1470$ м³.

$$j_{\theta}^{EK} = 0,169 \cdot 8,66 \cdot 10^{-3} \cdot 1470 \cdot (100 - 97,5) \cdot (1 - 0,16) \cdot 24 = 107,6 \text{ кг/сут.}$$

Количество влаги, удаляемой в цикле вынужденной конвекции, определяется отдельно для основного и корректирующего слоев насыпи. При высоте корректирующего слоя 10 % от общей высоты насыпи его объем $V_{кc} = 0,1 \cdot 1470 = 147$ м³. Тогда объем основного слоя $V_{ос} = 1470 - 147 = 1323$ м³.

По (2.77) для основного слоя $j_{\theta_{ос}}^{BK} = 0,169 \cdot \alpha_{\theta} \cdot V_{ос} \cdot (100 - \varphi_p) \cdot K_v \cdot 24 = 0,169 \cdot 8,66 \cdot 10^{-3} \cdot 1323 \cdot (100 - 97,5) \cdot 0,16 \cdot 24 = 18,5$ кг/сут.

По (2.78) и рис. 2.23 для корректирующего слоя $j_{\theta_{кc}}^{BK} = \alpha_{\theta} \cdot 10^{-3} \cdot V_{кc} \cdot \Delta\theta_{кc} \cdot K_v \cdot 24 = 8,66 \cdot 10^{-3} \cdot 147 \cdot 0,5 \cdot 0,16 \cdot 24 = 2,4$ кг/сут.

Общие потери влаги в течение суток составляют (2.79) $j_{\theta_{об}} = j_{\theta}^{EK} + j_{\theta_{ос}}^{BK} + j_{\theta_{кc}}^{BK} = 107,6 + 18,5 + 2,4 = 128,5$ кг/сут. = 0,1285 т/сут.

Естественная убыль в течение суток равна $(0,1285/1000) \cdot 100$ % = 0,01285 %, в течение месяца $0,01285 \cdot 30 = 0,386$ %. Для сравнения, предельные нормы естественной убыли картофеля в основной период хранения в стационарных хранилищах без искусственного охлаждения [17]: декабрь – 0,5 %; январь – 0,3 %; февраль – 0,3...0,5 %; март – 0,5 %; апрель – 0,9...1,0 %.

Методика расчета интенсивности влагообмена в слое сохнувшей травы на основе потенциала влажности

Интенсивность потерь влаги сохнувшей травой в общем случае определяется по (2.60). Потенциал влажности воздуха в зависимости от его температуры и относительной влажности находится по соотношениям (2.58) или (2.59). Потенциал влажности воздуха, выходящего из слоя активно сохнувшей травы (I , рис. 2.17) находится по его температуре в точке B (рис. 2.18) с учетом подогрева за счет биологических тепловыделений травы, определяемого по (2.49), и φ_p , соответствующей влажности травы

по кривым десорбции. Потенциал влажности воздуха у поверхности сохнущей травы $\theta_{\text{пов}}$ зависит от влажности массы: при $w_{\text{тр}} > w_{\text{Г}}$ $\varphi_{\text{пов}} \approx 100\%$, при $w_{\text{тр}} < w_{\text{Г}}$ $\varphi_{\text{пов}} = \varphi_{\text{р}}$. Текущая температура поверхности в корректирующем слое травы определяется по соотношению (рис. 2.18):

$$t_{\text{к}} = t_{\text{Г}} + (t_{\text{А}} - t_{\text{Г}} + \Delta t_{\text{во}}) x / x_{\text{к}}. \quad (2.80)$$

В основном слое (II, рис. 2.17) разность потенциалов влажности поверхности сохнущей травы и влажного воздуха $\Delta\theta_{\text{к}}$ постоянна в связи с постоянством относительной влажности воздуха в слое ($\varphi_{\text{р}} = \varphi_{\text{в}} = \text{const}$) и разности температур поверхности продукции и воздуха ($q_{\text{в}} / \alpha_{\text{тв}} = \text{const}$, формула 2.61). Последнее утверждение справедливо в связи с аналогией теплофизических процессов тепломассопереноса в основных слоях насыпей сочного растительного сырья и сохнущей травы, как это было показано выше.

В результате проводимых в ННГАСУ экспериментальных, лабораторных и натурных исследований интенсивности сушки травы получены значения потенциалов влажности воздуха в слое. Методика определения значений θ приведена в [18, 19]. С учетом кривых десорбции злаковых (луговых) и бобовых (люцерна) трав и зависимости относительной влажности воздуха от потенциала влажности для температур 15, 20, 30 и 40 °С построены кривые десорбции в координатах $w_{\text{тр}} - \theta$ °В (рис. 2.25, 2.26). Они являются исходными характеристиками при расчете интенсивности сушки слоя травы.

Достижение сохнущей травой кондиционной влажности для сена $w_{\text{к}} = 17...19\%$ однозначно фиксируется величиной потенциала влажности воздуха θ , выходящего из слоя (рис. 2.25, 2.26). Значения потенциалов влажности воздуха, характеризующие окончание процесса сушки, приведены в табл. 2.3.

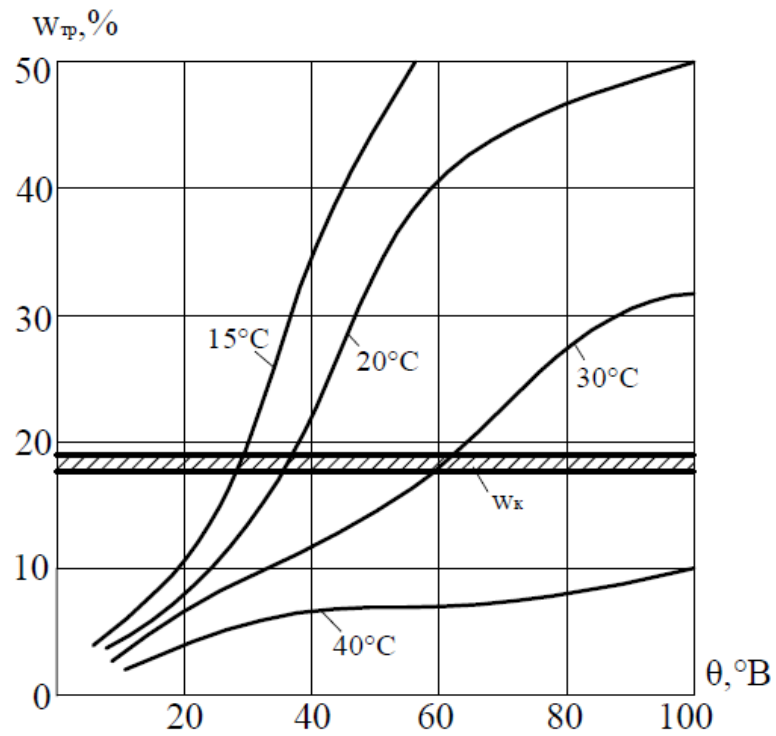


Рис. 2.25. Кривые десорбции злаковых (луговых) трав в координатах $w_{тр} - \theta$

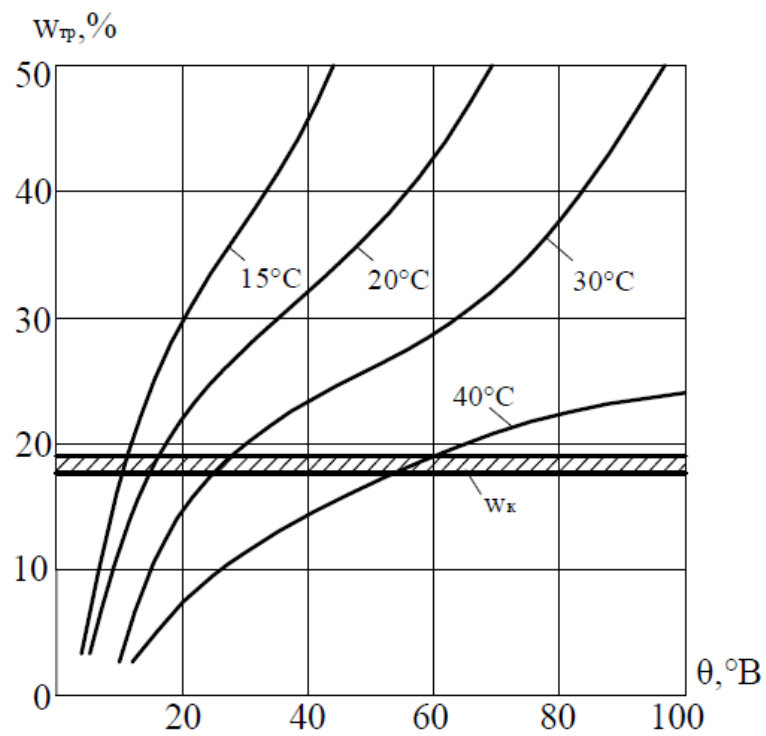


Рис. 2.26. Кривые десорбции бобовых (люцерна) трав в координатах $w_{тр} - \theta$

Т а б л и ц а 2.3

**Минимальные значения потенциала влажности воздуха,
выходящего из слоя травы**

| Температура воздуха, °С | Потенциал влажности θ , °В | |
|-------------------------|-----------------------------------|-------------------------|
| | Злаковая (луговая) трава | Бобовая трава (люцерна) |
| 15 | 27...28 | 9...9,5 |
| 20 | 36...37 | 16...17 |
| 30 | 60 | 31...32 |
| 40 | - | 62...64 |

Основной слой. Согласно теплофизической модели сушки травы в основном слое $\varphi_p = \text{const}$, $w_{\text{тр}} > w_{\text{г}}$ влагообмен идет без углубления зоны испарения, $\varphi_{\text{пов}} \approx 100\%$. Доля поверхности травы, участвующей во влагообмене с воздухом, больше, чем у сочного растительного сырья, достигая, например, величин для грубого чайного листа $\varepsilon_{\text{и}} = 0,42$, а для нежного $\varepsilon_{\text{и}} = 0,58$ [83]. Поэтому разность температур ($t_{\text{пов}} - t_{\text{в}}$) в слое травы меньше, чем в насыпях картофеля и овощей из-за увеличения эффекта испарительного охлаждения. Пропорциональное увеличение $t_{\text{пов}}$ и $t_{\text{в}}$ по высоте слоя не изменяет величины $\Delta\theta_{\text{т}}$. В соответствии с (2.53) и (2.59) разность потенциалов влажности между поверхностью травы и воздухом равна:

$$\Delta\theta = 0,204(100 - \varphi_p). \quad (2.81)$$

Для определения тепловыделений травы с влажностью выше гигроскопической осредним экспериментальные значения $\Delta t / \Delta \tau$ (рис. 1.5) [18, 19] в практически необходимых пределах $w_{\text{тр}} = 30...40\%$: $\Delta t / \Delta \tau \cong 0,8\text{ }^\circ\text{C}$. Стебли и листья травы такой влажности имеют удельную теплоемкость $c_{\text{тр}} = 1,26\text{ кДж}/(\text{кг } ^\circ\text{C})$ (рис. 1.8). Удельные явные тепловыделения травы составляют: $q_{\text{тр}} = 10^3 c_{\text{тр}} \Delta t / \Delta \tau = 10^3 \cdot 1,26 \cdot 0,8 = 1000\text{ кДж}/(\text{т}\cdot\text{ч}) = 278\text{ Вт}/\text{т}$.

На основе данных таблиц термодинамических свойств влажного воздуха и математической обработки их получена зависимость тепловлажностного отношения для диапазона температур $t = 15...35\text{ }^\circ\text{C}$:

$$\varepsilon_t = 6385 - 88t. \quad (2.82)$$

Общее количество испарившейся из травы влаги:

$$W = q_{\text{тр}} G_{\text{тр}} / (6385 - 88t). \quad (2.83)$$

Значения коэффициента влагоотдачи в основном слое сохнувшей травы α_θ , кг/(ч·т °В), с учетом (2.81) и (2.83) определяются из равенства:

$$\alpha_\theta = W / \Delta\theta_T = q_{\text{тр}} G_{\text{тр}} / 0,204(100 - \varphi_p)(6385 - 88t). \quad (2.84)$$

Результаты расчетов по (2.84) при $\varphi_p = 98\%$ сведены в табл. 2.4.

Т а б л и ц а 2.4

Значения коэффициентов α_θ и α'_θ

| Коэффициенты | $t = 15\text{ °C}$ | $t = 20\text{ °C}$ | $t = 25\text{ °C}$ | $t = 30\text{ °C}$ |
|---------------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| ε_i , кДж/кг | 5065 | 4625 | 4185 | 3481 |
| α_θ , кг/(т ч °В) | 0,484 | 0,530 | 0,580 | 0,704 |
| α'_θ , кг/(м ³ ч °В) | 0,0532 | 0,0583 | 0,0640 | 0,0774 |

При массовой плотности слоя травы $\rho_n = 110\text{ кг/м}^3$ коэффициент $\alpha'_\theta = 0,11\alpha_\theta$. Графическая зависимость $\alpha_\theta = f(t)$ приведена на рис. 2.27. Значения α_θ осреднены по периоду сушки и ботаническим составам трав.

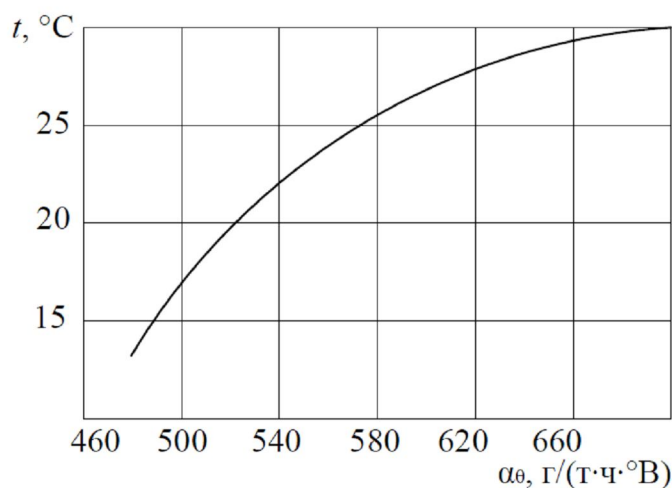


Рис.2.27. Значения коэффициента α_θ в основном слое сохнувшей травы

Слой активно сохнувшей травы (корректирующий). В соответствии с (2.59) в слое активно сохнувшей травы:

$$\Delta\theta_T = 1,22(t_{\text{пов}} - t_B) + 0,204(\varphi_{\text{пов}} - \varphi_p). \quad (2.85)$$

Экспериментальная зависимость количества испаряющейся влаги за счет биологической теплоты скошенной травы (рис. 2.28 [70]) показывает, что при начальной влажности травы $25 < w_{\text{тр}} < 45$ % ($w_{\text{тр}}^{\text{сп}} = 35$ %) около 25 % воды испаряется за счет теплоты дыхания, которую требуется учитывать в практических расчетах.

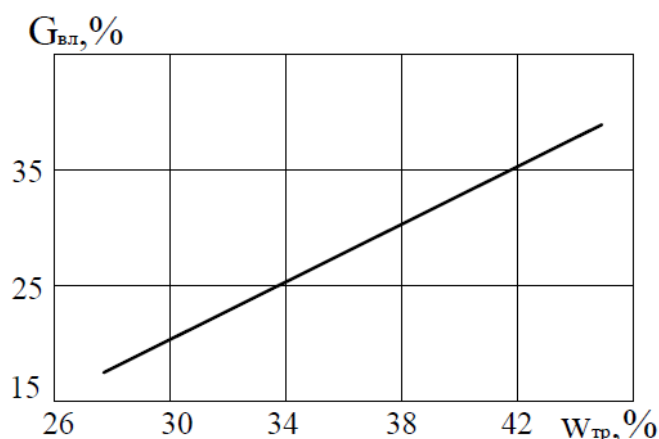
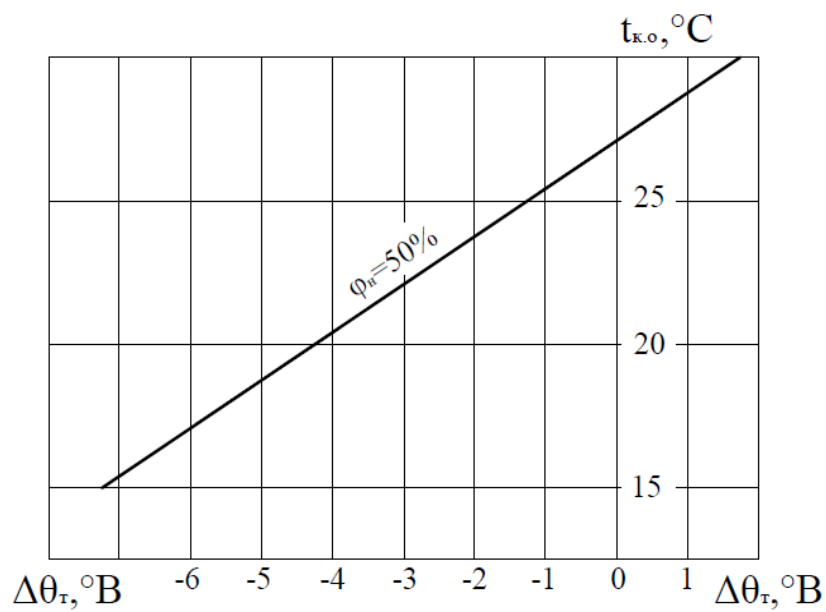


Рис. 2.28. Зависимость количества испаряемой влаги за счет явных тепловыделений $q_{\text{тр}}$ от влажности травы $w_{\text{тр}}$

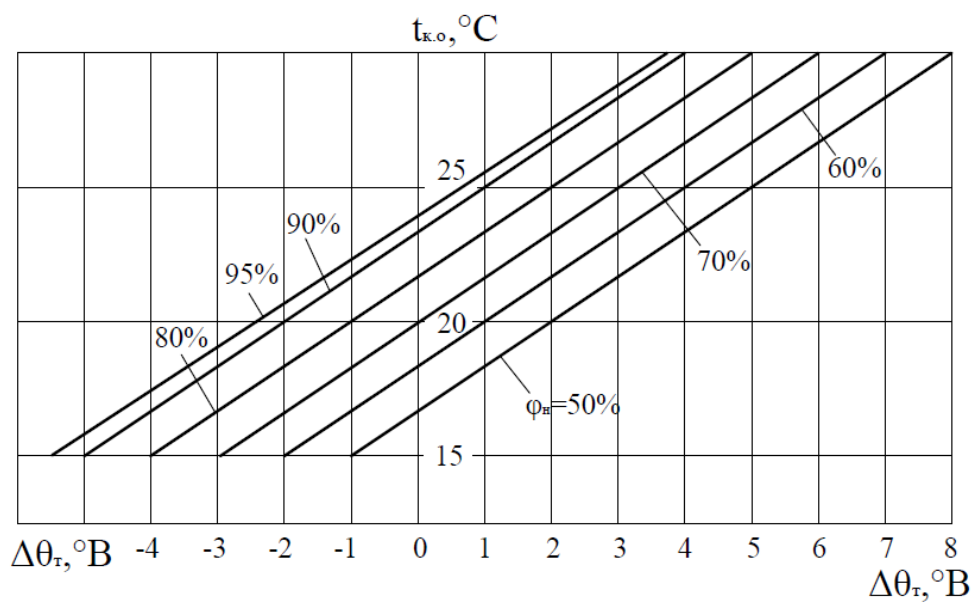
Методические доказательства и обоснования получения расчетных значений разностей потенциалов влажности между сохнущей травой и продуваемым воздухом $\Delta\theta_{\text{т}}$ в корректирующем и основном слоях приведены в [18, 19]. Для практических инженерных расчетов предложены графоаналитические зависимости $\Delta\theta_{\text{т}} = f(t_{\text{во}}, t_{\text{ко}}, \varphi_{\text{н}})$.

На рис. 2.29 приведены рассчитанные по (2.85) разности потенциалов влажности $\Delta\theta_{\text{т}}$ между поверхностью травы и воздухом в сверхгигроскопической области сушки ($w_{\text{тр}} > w_{\text{г}}$) в диапазоне параметров наружного воздуха: $t_{\text{н}} = 15 \dots 30$ °С; $\varphi_{\text{н}} = 50 \dots 95$ %; при температурах травы $t_{\text{к}} = 15 \dots 30$ °С.

Аналогичные данные для гигроскопической области сушки ($w_{\text{тр}} < w_{\text{г}}$) графически представлены на рис. 2.30.

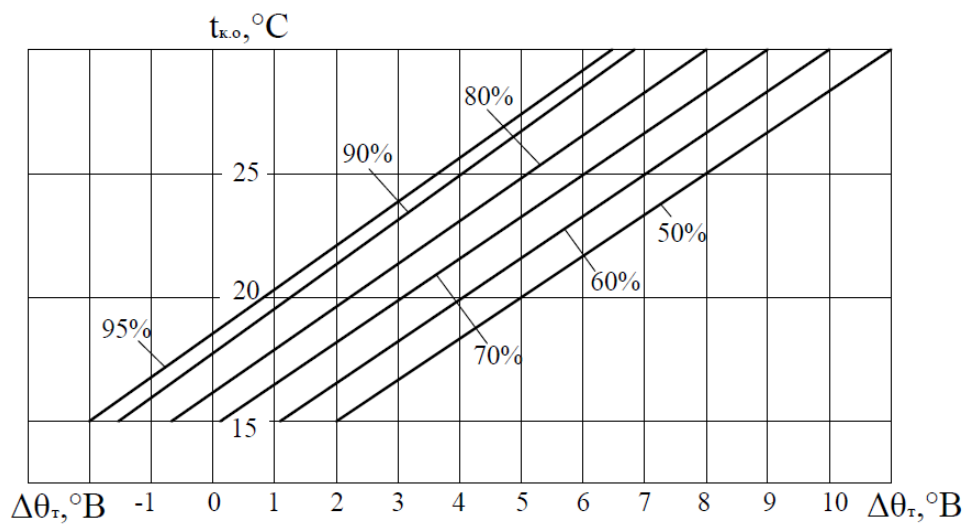


a

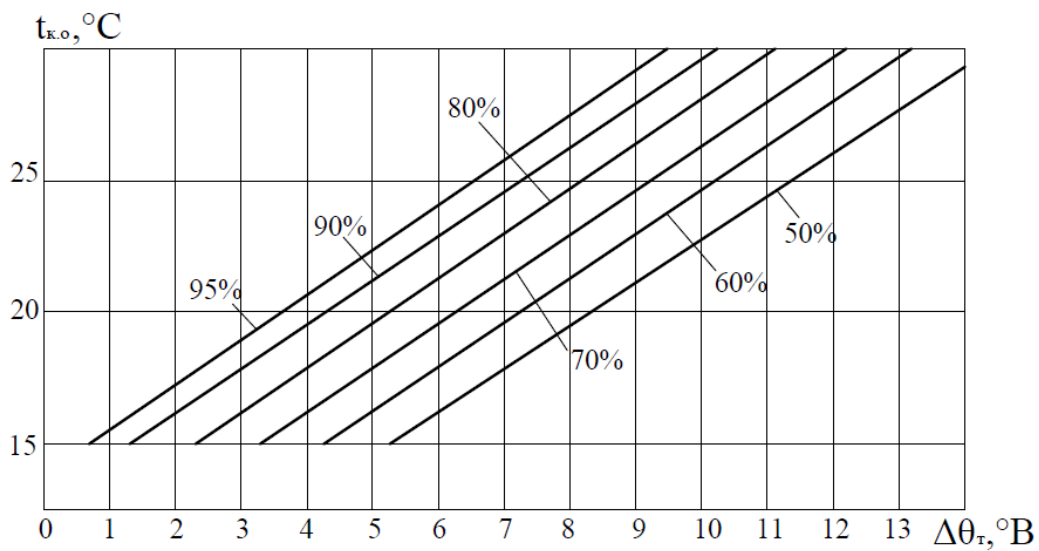


б

Рис. 2.29. Зависимости разностей потенциалов влажностей $\Delta\theta_{\tau} = f(t_{\text{н}}, t_{\text{к.о.}}, \varphi_{\text{н}})$ при $w_{\text{тп}} > w_{\text{т}}$ (сверхгигроскопическая область) [18]: а – при $t_{\text{н}} = 35^{\circ}\text{C}$; б – при $t_{\text{н}} = 25^{\circ}\text{C}$



6



2

Рис. 2.29 (продолжение). Зависимости разностей потенциалов влажностей $\Delta\theta_\tau = f(t_{\text{н}}, t_{\text{к.о.}}, \varphi_{\text{н}})$ при $w_{\text{тр}} > w_\Gamma$ (сверхгигроскопическая область) [18]:
 6 – при $t_{\text{н}} = 20 ^{\circ}\text{C}$; 2 – при $t_{\text{н}} = 15 ^{\circ}\text{C}$

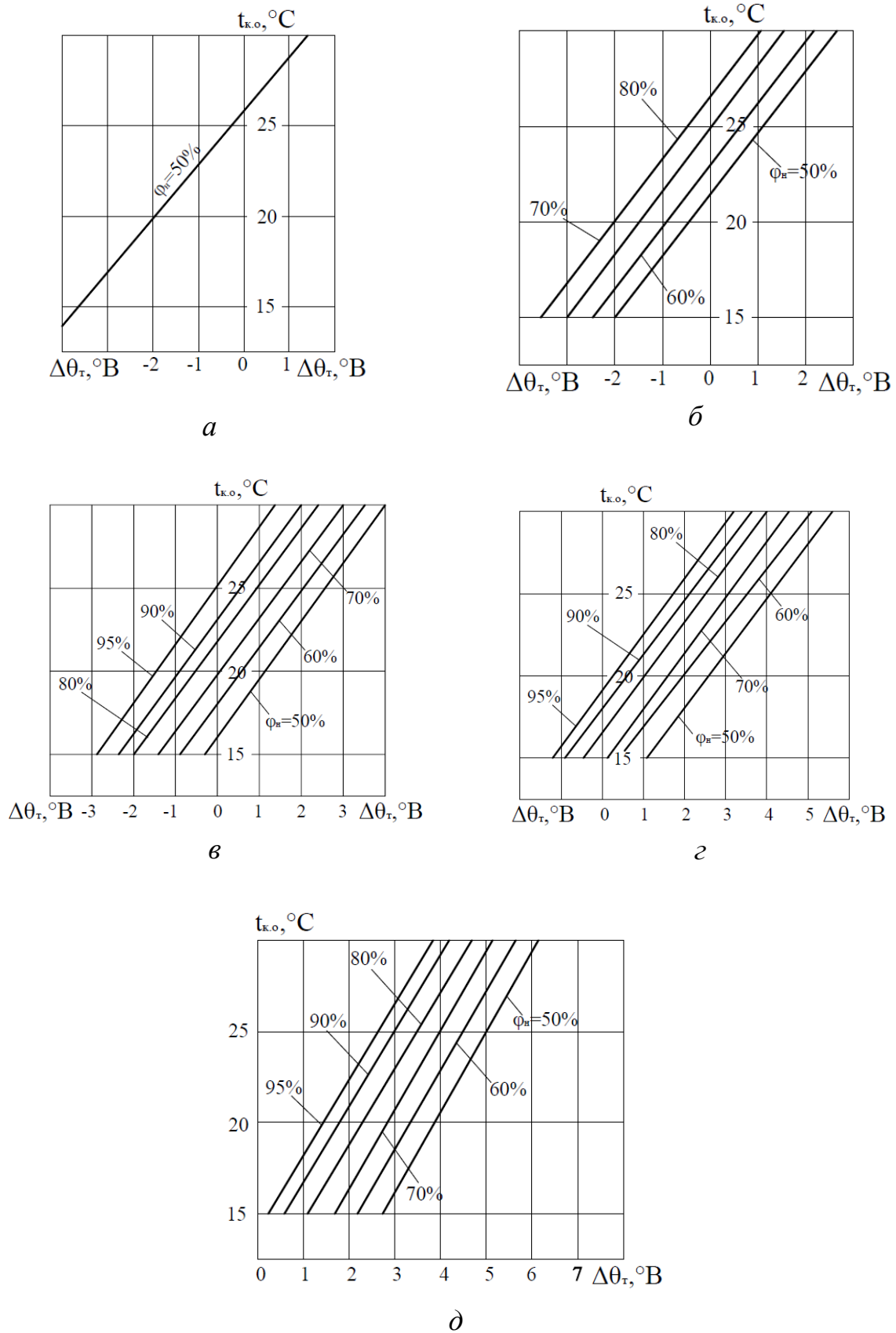


Рис. 2.30. Зависимости разностей потенциалов влажностей $\Delta\theta_T = f(t_n, t_{к.о.}, \varphi_n)$ при $w_{тр} < w_{г}$ (гигроскопическая область) [18]: а – при $t_n = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$; б – при $t_n = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$; в – при $t_n = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$; г – при $t_n = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$; д – при $t_n = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$

Анализ графических зависимостей на рис. 2.29 и 2.30 позволяет сделать ряд практических выводов и рекомендаций.

1. Увеличение относительной влажности подаваемого в слой травы воздуха φ_n , повышение его температуры t_n при $\varphi_n = \text{const}$, непрерывная продувка слоя, приводящая к понижению температуры травы ($t_k \rightarrow t_{м.т}$) – все эти факторы снижают эффективность процесса сушки.

2. Оптимизация продолжительности процесса сушки травы и технико-экономические показатели процесса достигаются введением циклических режимов работы систем активной вентиляции, чередующих самонагревание травы и последующее охлаждение, сопровождающееся сушкой.

3. Следует избегать режимов работы систем активной вентиляции при параметрах наружного воздуха и травы, характеризующихся областями, лежащими на рис. 2.29 и 2.30 слева от ординаты $\Delta\theta_T = 0$. В противном случае продувка слоя сопровождается увлажнением продукции.

Контроль процесса сушки травы. Использование изотерм десорбции различных сортов травы для контроля сушки предполагает одновременную фиксацию двух независимых параметров процесса: температуры t_v и относительной влажности воздуха φ_v в слое. Нахождение значений t_v не представляет технических трудностей. В то же время определение величины φ_v в массе травы традиционными методами по температурам сухого и мокрого термометров практически не выполнимо из-за $t_v \rightarrow t_{м.т}$ и $\varphi_v \rightarrow 100\%$ в слое травы, продуваемом воздухом.

В ННГАСУ предложен и проверен в натуральных условиях способ контроля влажности уложенной в слой сохнущей травы по единому термодинамическому показателю – потенциалу влажности θ . Потенциал влажности определяется с помощью разработанного в ННГАСУ термовлагощупа, конструкция которого приведена в [18, 19]. Текущая влажность сохнущей травы находится по кривым десорбции травы в координатах $w_{тр} - \theta$, изображенных на рис. 2.25 и 2.26.

Последовательность замеров влажности травы. В муфты термо-влажощупа вкладываются образцы фильтровальной бумаги, масса которых в абсолютно сухом состоянии m_c определялась после обработки в сушильном шкафу. Термовлажощуп внедрялся в слой сохнущей травы на 1,5 часа, после чего термомпарами фиксировались температура t_b и на электронных весах увеличение массы фильтровальной бумаги Δm в каждой из пяти муфт.

Известное влагосодержание фильтровальной бумаги u , кг/кг, и ее температуры позволяли определить значения потенциалов влажности θ (рис. 2.31) и по ним искомую влажность травы $w_{тр}$ в различных сечениях по графикам на рис. 2.25 и 2.26.

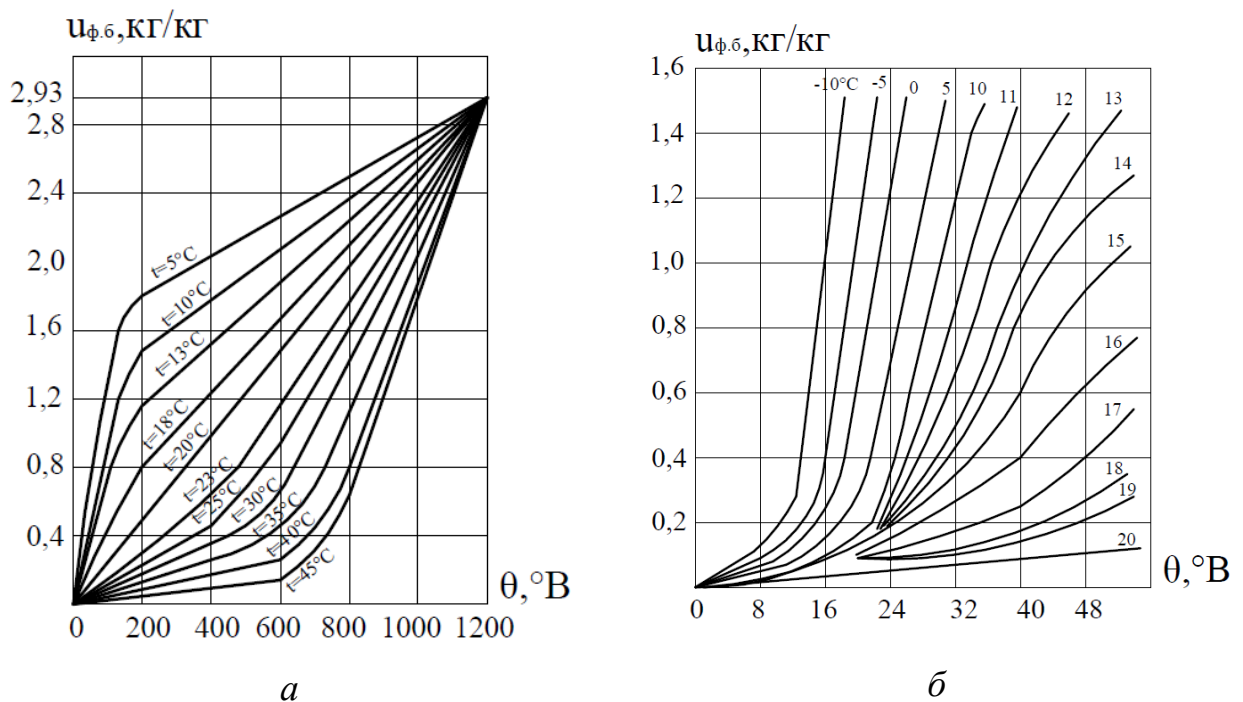


Рис. 2.31. Шкала потенциала влажности [10]: *а* – при различных температурах; *б* – в диапазоне 0...50 $^{\circ}B$, включая область отрицательных температур

Некоторые результаты контрольных замеров влажности люцерны в процессе сушки и хранения приведены на рис. 2.32.

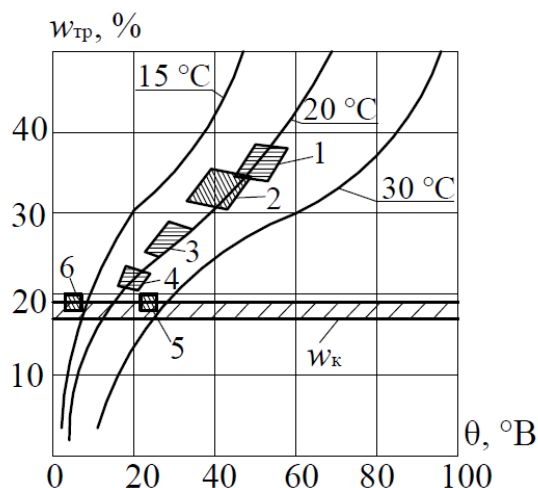


Рис. 2.32. Области экспериментальных значений потенциалов влажности воздуха в скирде люцерны (2005 г.):
 1 – 06.07; 2 – 07.07; 3 – 09.07; 4 – 12.07; 5 – 17.07; 6 – 20.11 ($t_n = -3\text{ °C}$)

Применение потенциала влажности в качестве критерия контроля процесса сушки травы упрощает проведение и увеличивает точность замеров влажности травы $w_{гр}$ из-за возможности фиксации двух легко измеряемых физических величин: массы и температуры.

Особенности расчета интенсивности переноса влаги через наружные ограждения

Влажностный режим ограждений. Эксплуатационное влажностное состояние наружных ограждений подразумевает периодическое изменение влагосодержания в течение года около своего постоянного среднегодового значения. В гражданских и промышленных зданиях оно несколько возрастает в апреле-мае и понижается к осени, зимой значения влажности близки к среднегодовым [11]. Просыхание надземных стен овощехранилищ из-за сезонной эксплуатации наблюдается в летний период, а увлажнение – в холодный период. Влажность подземных стен практически не зависит от периода эксплуатации. Помещения хранилищ (за исключением лукохранилищ) относятся к мокрым помещениям, и тепло-

физические характеристики материалов для всех зон строительства следует выбирать по группе Б*.

Наиболее полно влажностный режим материалов ограждений описывается с помощью потенциала влажности. Для практических расчетов достаточно рассмотрения стационарной влагопередачи [10, 11]. Потенциал влажности наружного θ_n и внутреннего θ_v воздуха определяется зависимостями (2.55...2.59).

Эксплуатационное влажностное состояние любого слоя материала многослойного ограждения находится по формуле [11]:

$$\theta_{\text{сл}} = \theta_v - \bar{R}_{\text{в-сл}}(\theta_v - \theta_n), \quad (2.86)$$

где $\bar{R}_{\text{в-сл}}$ – относительное сопротивление влагопередаче.

Интенсивность влагопереноса через наружные ограждения равна:

$$j_\theta = \chi(\theta_v - \theta_n). \quad (2.87)$$

Экспериментальные значения коэффициента влагопроводности χ для глиняного кирпича и пенобетона приведены в [10].

Анализ зависимостей (2.55...2.59) показывает, что в холодный период года в хранилищах потенциал влажности внутреннего воздуха θ_v больше наружного θ_n ($t_v > t_n$, $\varphi_v \geq \varphi_n$). Поэтому влага через надземные ограждения удаляется в атмосферу. Для предотвращения увлажнения ограждений слой пароизоляции должен предусматриваться с внутренней стороны. У подземных ограждений в связи с их контактом с грунтом, имеющим влажность выше гигроскопической ($\theta_{\text{гр}} > \theta_v$), мероприятия по предупреждению увлажнения конструкций выполняются с внешней стороны стен хранилищ.

Искусственное регулирование потока влаги через наружные ограждения является одним из условий повышения эксплуатационных характеристик конструкций. В конечном итоге это является перспективным путем создания ограждений с регулируемыми сопротивлениями теплопередаче.

Регулирование потока влаги через конструкции может осуществляться за счет электроосмотического эффекта. В технической литературе указывается на возможность использования такого способа для управления миграцией влаги [87]. Однако ни широкого технического воплощения, ни достаточного теоретического обоснования с получением функциональных зависимостей для инженерных расчетов применительно к ограждающим конструкциям этот способ до настоящего времени не получил.

По своей термодинамической сущности эффект электроосмоса представляет собой характеристику интенсивности, которая обуславливает направление и предел переноса вещества. Он дополнительно накладывается на другие действующие в системе «влажный воздух – ограждение» градиенты переноса влаги.

Различают электроосмос с пассивным и с активным возбуждением. Явление передвижения влаги за счет пассивного электроосмоса наблюдается при установке в стене двух связанных между собой электродов, изготовленных из разных металлов. Интенсивность миграции влаги пропорциональна возникающему потенциалу, зависящему от электрохимического ряда напряжения металлов. Интенсивность капиллярного или осмотического движения влаги или изменение направления ее движения на противоположное более активно и эффективно регулируется при использовании напряжения от источника постоянного тока (активное возбуждение). На рисунке 2.33а показана принципиальная схема установки плоскостей электродов для предотвращения увлажнения надземной части стен от миграции влаги из их подземной части при пассивном и активном возбуждении. Способ сушки расположенных в земле стен изображен на рис. 2.33б. Пунктирными стрелками показано направление миграции влаги за счет осмотических и капиллярных сил, сплошными – за счет явления электроосмоса.

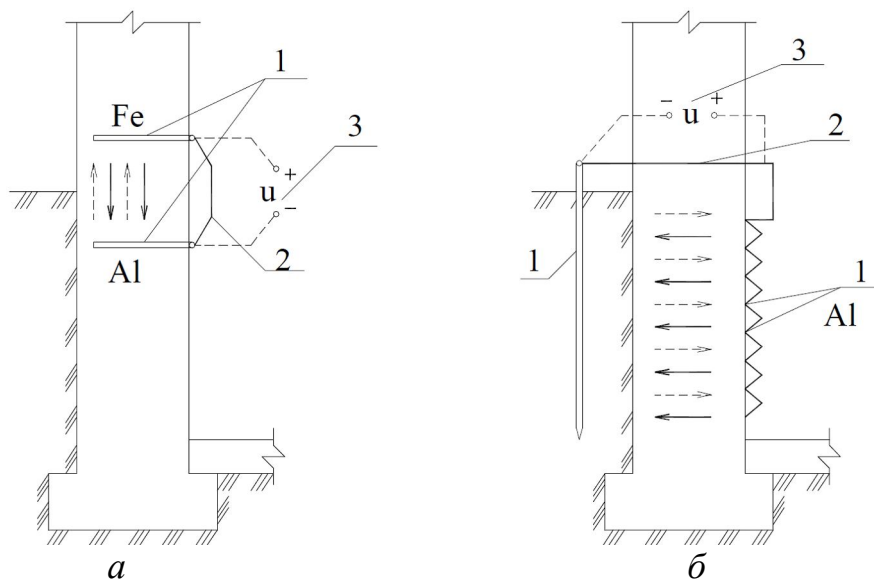


Рис. 2.33. Установка электродов для предотвращения движения влаги в стенах: *а* – надземных; *б* – подземных; 1 – электроды; 2 – изолированные проводники короткого замыкания при пассивном электроосмосе; 3 – источники постоянного тока при активном возбуждении

Разность потенциалов влажности в ограждении увеличивается или уменьшается на величину эффекта электроосмоса $\pm \Delta\theta_{30}$. Знак (+) или (–) принимается в зависимости от расположения электродов по электрохимической активности относительно направления движения мигрирующей влаги или от полярности электродов, вызывающей направленное движение жидкости. Общий поток влаги составляет:

$$j = \chi(\theta_{\text{в}} - \theta_{\text{н}} \pm \Delta\theta_{30}). \quad (2.88)$$

Задача состоит в экспериментальном выявлении закономерностей изменения плотностей потоков влаги в строительных конструкциях, зависящих от физико-механических свойств материалов, прикладываемого к электродам напряжения и его полярности, и представлении полученных результатов в шкале потенциалов влажности в виде:

$$\Delta\theta_{30} = K_{30}U, \quad (2.89)$$

где K_{30} – коэффициент пропорциональности; U – напряжение, прикладываемое к электродам или возникающее между электрохимически активными металлами электродов.

Интенсивность электроосмотического потока влаги определялась в ходе постановочных лабораторных исследований [20]. На рисунке 2.34 приведены графические результаты объемной скорости электроосмоса через образец глиняного кирпича $v_3 = v/\tau$, $\text{м}^3/\text{с}$, в зависимости от прикладываемого напряжения к электродам U , В. Пересчет удельного объема жидкости, переносимой через единицу площади глиняного кирпича толщиной $\delta = 0,13$ м v_{3F} , $\text{м}^3/(\text{м}^2 \text{ ч})$, по значениям экспериментальных данных v_3 , $\text{м}^3/\text{с}$, определяется соотношением $v_{3F} = 5 \cdot 10^{-7} v_3$.

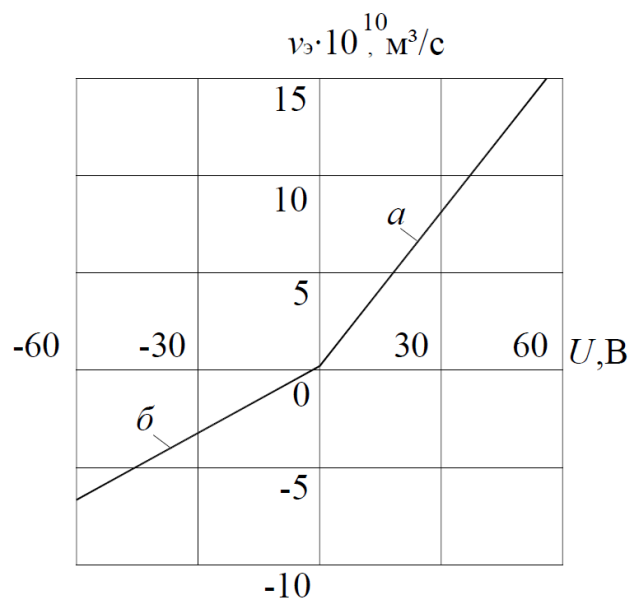


Рис. 2.34. Объемная скорость электроосмоса через образец глиняного кирпича

В ходе дальнейших исследований должно быть уточнено влияние эффекта электролиза, который, по нашему мнению, ответственен за перелом в нулевой точке графика $v_3 = f(U)$ во всех проведенных сериях опытов.

Оценка влияния интенсивности капиллярного всасывания жидкой влаги на перенос массы через образец глиняного кирпича показывает, что на величину эффекта электроосмоса это явление не оказывает заметного влияния. Средняя в течение суток скорость капиллярного всасывания для глиняного кирпича $u_{\text{кв}} = 4,3 \cdot 10^{-3}$ см/мин = $0,72 \cdot 10^{-3}$ мм/с [22]. Через образец толщиной $\delta = 13$ мм жидкая влага за счет капиллярного всасывания будет двигаться $\tau_{\text{кв}} = \delta / u_{\text{кв}} = 13 / 0,72 \cdot 10^{-3} = 1,82 \cdot 10^4$ с, то есть около 5 часов.

В реальных условиях явление эффекта электролиза при предотвращении фильтрации влаги через ограждения или при их сушке не сказывается на интенсивность переноса (выделяемые на поверхностях газы рассеиваются в воздух). Поэтому дальнейший анализ экспериментальных данных проводим без учета явления электролиза.

Электроосмотический поток влаги равен:

$$j_3 = \chi_3 U / \delta. \quad (2.90)$$

Электроосмотический коэффициент влагопроводности χ_3 , г/(м·с·В), согласно прямой *b* на рис. 2.35, имеет величину:

$$\chi_3 = 8,43 \cdot 10^{-5}. \quad (2.91)$$

Соотношение между прикладываемым напряжением U , В, и разностью действительных парциальных давлений по обе стороны строительной конструкции $\Delta e = e_a - e_b$, Па, определим, приравняв потоки, вызываемые этим потенциалом переноса:

$$\chi_3 U / \delta = \mu \Delta e / \delta. \quad (2.92)$$

Отсюда:

$$\Delta e = \chi_3 U / \mu; \quad U = \mu \Delta e / \chi_3, \quad (2.93)$$

где μ – коэффициент паропроницаемости, г/(м·с·Па).

Кладка из обыкновенного глиняного кирпича ($\rho = 1700$ кг/м³) имеет $\mu = 0,12$ мг/(м·ч·Па) = $3,33 \cdot 10^{-8}$ г/(м·с·Па). Сопоставляя значения μ и χ_3 по (2.91), имеем:

$$\chi_3 = 2,53 \cdot 10^3 \mu. \quad (2.94)$$

Подставляя в (2.93) значения $e_a = \varphi_a p_{на}$, $e_b = \varphi_b p_{нб}$ и χ_3 по (2.94), найдем напряжение U :

$$U = 0,369 \cdot 10^{-3} (\varphi_a p_{на} - \varphi_b p_{нб}), \quad (2.95)$$

где p_n – парциальное давление насыщенного пара при температуре воздушно-паровой смеси, Па.

Аналитическую взаимосвязь потенциала влажности и относительной влажности воздуха определим аппроксимацией графических зависимостей этих величин при различных температурах, показанных на рис. 2.35:

$$t = 40 \text{ }^\circ\text{C}, \quad \varphi = 30 \dots 50 \%, \quad \varphi = 22,2 + \theta/3,6; \quad (2.96)$$

$$t = 35 \text{ }^\circ\text{C}, \quad \varphi = 35 \dots 60 \%, \quad \varphi = 26,7 + \theta/3,0; \quad (2.97)$$

$$t = 30 \text{ }^\circ\text{C}, \quad \varphi = 50 \dots 75 \%, \quad \varphi = 25,0 + \theta/2,4; \quad (2.98)$$

$$t = 25 \text{ }^\circ\text{C}, \quad \varphi = 65 \dots 90 \%, \quad \varphi = \theta/2,63; \quad (2.99)$$

$$\varphi = 0 \dots 65 \%, \quad \varphi = (\theta - 5)/0,662; \quad (2.100)$$

$$t = 20 \text{ }^\circ\text{C}, \quad \varphi = 80 \dots 100 \%, \quad \varphi = 13,3 + \theta/3,0; \quad (2.101)$$

$$\varphi = 0 \dots 80 \%, \quad \varphi = (\theta - 5)/0,43; \quad (2.102)$$

$$t = 18 \text{ }^\circ\text{C}, \quad \varphi = 0 \dots 85 \%, \quad \varphi = (\theta - 10)/0,25; \quad (2.103)$$

$$\varphi = 85 \dots 95 \%, \quad \varphi = (\theta - 10)/0,1; \quad (2.104)$$

$$t = 0 \text{ }^\circ\text{C}, \quad \varphi = 0 \dots 95 \%, \quad \varphi = (\theta - 10)/0,05. \quad (2.105)$$

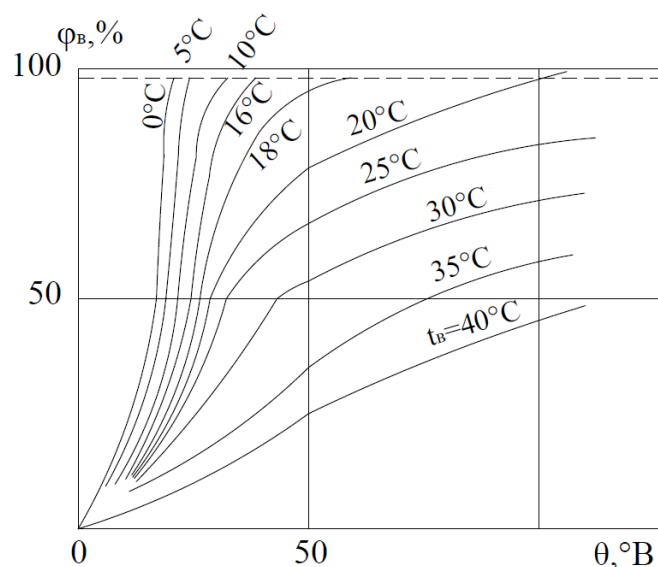


Рис. 2.35. Зависимость относительной влажности воздуха от потенциала влажности [10]

Подставляя из (2.96...2.105) в (2.95) значения φ , определяем необходимое напряжение U , соответствующее климатическим условиям у поверхностей конструкций из глиняного кирпича, или разность потенциалов влажностей $(\theta_a - \theta_b)$, при которой интенсивность переноса влаги равна расчетной при напряжении U с обязательным контролем знаков (+) или (-) перед величиной U при подстановке ее в (2.90).

Глава 3. ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКО- ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ТЕПЛОМАССООБМЕНУ В БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ СИСТЕМАХ

Теплофизические основы расчета производительности и режимов работы систем обеспечения микроклимата овощекартофелехранилищ

Способы хранения сочного растительного сырья. Назначение овощекартофелехранилищ – обеспечить сохранность продукции в течение осеннего, зимнего и весеннего периодов года для продовольственных, фуражных, технических и семенных целей. При массовом хранении картофеля и овощей применяются временные и постоянные хранилища. Временные сооружения (бурты) используются, как правило, в полевых условиях. Постоянные хранилища оборудуются инженерными системами поддержания технологических параметров микроклимата.

В зданиях с естественной вентиляцией воздухообмен осуществляется за счет гравитационных сил (рис. 3.1а). Естественная вентиляция может обеспечить технологические параметры хранения насыпей клубнекорнеплодов высотой до 1,0 м, насыпей белокочанной капусты – до 0,8 м.

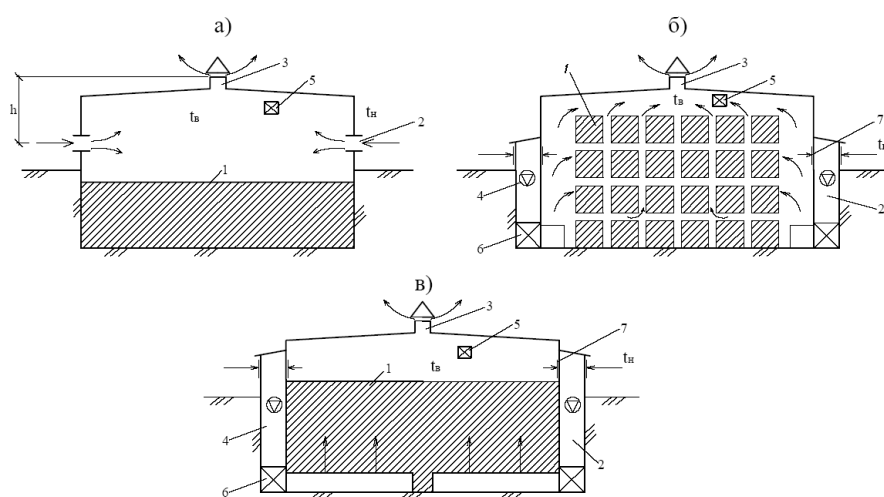


Рис. 3.1. Стационарные хранилища с естественной (а), общеобменной (б) и активной (в) вентиляцией: 1 – продукция; 2, 3, 7 – соответственно, приточные, вытяжные и рециркуляционные воздуховоды; 4 – вентилятор; 5 – отопительные агрегаты; 6 – оборудование для обработки приточного воздуха

Общеобменная механическая вентиляция (рис. 3.1б) применяется при контейнерном хранении. Основным недостатком такой схемы является формирование нормируемых параметров воздушной среды в объеме воздуха хранилища, а не в массе продукции каждого контейнера. Аналитически показано [17], что скорость воздуха в межклубневом пространстве в контейнерах составляет около 8,5 % средней скорости воздуха между контейнерами. Эта величина меньше скорости, необходимой для поддержания допустимых температурно-влажностных параметров среды в контейнерах, что позволяет сделать вывод о неэффективности управления параметрами микроклимата в массе продукции при контейнерном хранении путем изменения кратности воздухообменов в помещении хранилищ.

Принципиальным отличием активного вентилирования является возможность создания и регулирования заданных по технологии хранения параметров микроклимата вокруг каждого объекта хранения за счет подачи воздуха непосредственно в насыпь (рис. 3.1в).

Преобладающей хранения картоелея и овощей во временных сооружениях тенденцией в настоящее время является использование стационарных буртов с разборнощитовыми или постоянными покрытиями и системами активной вентиляции.

Расчет режимов работы систем активной вентиляции. Системы вентиляции картофелехранилищ. В разработку методик расчета заложены: теплофизическая модель процессов формирования температурных и влажностных полей в насыпях клубней; комплекс энергетических преобразований в объеме хранилищ. Методики расчетов режимов работы систем активной вентиляции дифференцированы по периодам хранения и пригодны для насыпей высотой h до 6,0 м. Последовательность расчетов и области применения подробно рассмотрены и обоснованы в [17, 18].

Период охлаждения. В этот период начальная разность температур насыпи и охлаждающего воздуха $\Delta T_o = t_{ко} - t_{во} = 10...20$ °С, оптимальный

температуры охлаждения клубней $\Delta z = 0,02 \dots 0,04$ °С/ч, явные тепловыделения продукции (в зависимости от травмированности) $q_v = 80 \dots 100$ кДж/(м³ч) = 32...36 Вт/т среднереализуемых в практике хранения клубней. Диапазон оптимальных для периода удельных расходов воздуха $L_{v \text{ опт}}$, м³/(м³ч), определяется условием:

$$(3,8 q_v + 1,1 \cdot 10^4 \Delta z_{\text{опт}}) / \Delta T_o \leq L_{v \text{ опт}} \leq 717 / h. \quad (3.1)$$

По графику (рис. 3.2, левая ордината) или по формуле (3.2) определяется коэффициент использования вентиляции $K_v = \Delta \tau_v / 24$, показывающий время работы системы активной вентиляции $\Delta \tau_v$, ч, в сутки:

$$K_v = 2 (1 + 0,25 \eta_{\text{эф}}) / (1 + 1,5 L_{\text{эф}}). \quad (3.2)$$

Параметр охлаждения $\eta_{\text{эф}}$, м³°С/кДж, в интервале численных значений 1...7 равен:

$$\eta_{\text{эф}} = 10^4 \Delta z / q_v. \quad (3.3)$$

Приведенный удельный расход воздуха $L_{\text{эф}}$, м³°С/кДж, определяется из соотношения:

$$L_{\text{эф}} = L_v \Delta T_o / q_v. \quad (3.4)$$

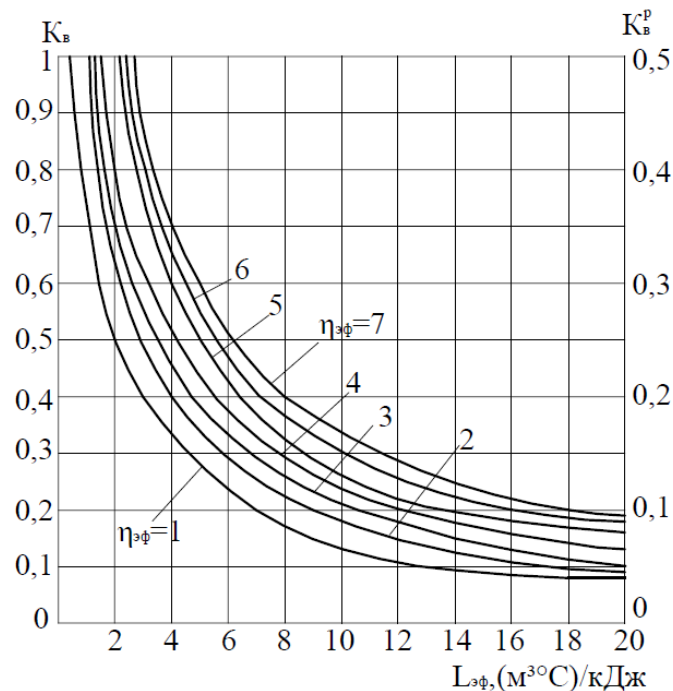


Рис.3.2. Коэффициент использования вентиляции в период охлаждения насыпи клубней

Работа системы активной вентиляции в период охлаждения ведется в холодное ночное время, что позволяет выделить режимы $K_B \leq 0,3$, как рациональные с использованием только естественного холода.

Основной период хранения. Исходные данные: $\Delta T_o = 10...20$ °С, $q_v = 43,5$ кДж/(м³ч) = 17,0 Вт/т; температура в нижней части хранилища $t'_{xp} = 1,5$ °С. Диапазон оптимальных расходов воздуха равен:

$$0,4 q_v \leq L_{v \text{ опт}} \leq 717 / h. \quad (3.5)$$

При условии $L_{v \text{ опт}} \leq 0,4 q_v$ необходима непрерывная вентиляция.

В [17] показано, что при температуре воздуха в нижней части хранилища $t'_{xp} = 1,5...2,0$ °С диапазону охлаждения насыпи клубней $t_{kk} = 4 - 2 = 2$ °С режимы работы систем активной вентиляции составляют:

$$\text{при } t'_{xp} \leq 3 \text{ °С} \quad K'_B = 0,4 q_v / L_v - 3,4 / L_v h; \quad (3.6)$$

$$\text{при } t'_{xp} > 3 \text{ °С} \quad K''_B = 0,65 q_v / L_v. \quad (3.7)$$

В формулах (3.6) и (3.7) размерности: q_v – кДж/(м³ч); L_v – м³/(м³ч).

Графическая зависимость K'_B , L_v , q_v и t'_{xp} приведена на рис. 3.3.

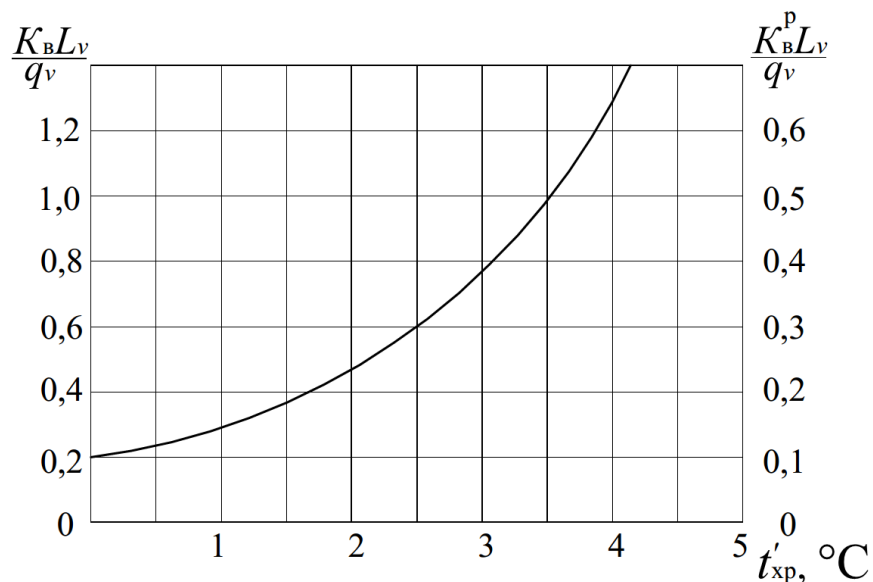


Рис. 3.3. Зависимость K'_B для расчета режимов работы систем активной вентиляции картофелехранилищ в основной период хранения

Разработанная методика расчета пригодна как при типовом проектировании и разработке проектов реконструкции хранилищ, так и для определения конкретных режимов эксплуатации в условиях действующих сооружений. Во втором случае (в условиях действующих картофелехранилищ) предварительно замеряется удельный расход воздуха L_v , подаваемого в насыпь. По нему находят значения K_b и время работы систем вентиляции в сутки для периодов охлаждения по (3.2) или рис. 3.2 и основного периода по (3.6) или (3.7) или рис. 3.3. Найденное время $\Delta\tau_b$ может отличаться от оптимального, но будет обеспечивать технологические параметры в насыпях клубней в оба периода хранения.

Биологические и теплофизические показатели свеклы столовой близки к характеристикам клубней. Поэтому разработанная методика расчета может быть принята и при ее хранении. Для моркови качественный характер процессов теплосъема и режимы работы систем активной вентиляции аналогичны, как и для насыпей клубней.

Пример 3.1. Определить длительность работы системы активной вентиляции в проектируемом картофелехранилище емкостью 1000 т, высота насыпи $h = 3,0$ м, расход воздуха $L_{v\text{ опт}} = 60 \text{ м}^3/(\text{м}^3 \text{ ч})$.

В период охлаждения начальная разность температур насыпи и охлаждающего воздуха $\Delta T_o = 14 \text{ }^\circ\text{C}$; скорость охлаждения клубней $\Delta z_{\text{ опт}} = 0,04 \text{ }^\circ\text{C/ч}$, интенсивность тепловыделений $q_v = 100 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \text{ ч})$. Параметр охлаждения $\eta_{\text{эф}} = 10^4 \cdot 0,04/100 = 4 \text{ (м}^3 \text{ }^\circ\text{C)}/\text{кДж}$, приведенный расход воздуха $L_{\text{эф}} = 60 \cdot 14/100 = 8,4 \text{ (м}^3 \text{ }^\circ\text{C)}/\text{кДж}$.

Диапазон расходов воздуха определяется условием (3.1) $L_{v\text{ опт}} > (3,8 \cdot 100 + 1,1 \cdot 10^4 \cdot 0,04)/14 = 58 \text{ м}^3/(\text{м}^3 \text{ ч})$. Коэффициент использования вентиляции в период охлаждения равен: $K_b = 2 (1 + 0,25 \cdot 4)/(1 + 1,50 \cdot 8,4) = 0,3$. Время работы системы активной вентиляции в течение суток $\Delta\tau_b = 24 \cdot 0,3 \approx 8,0$ часов.

В основной период хранения $\Delta T_o = 2,0 \dots 2,5 \text{ }^\circ\text{C}$; $t'_{\text{хр}} = 1,0 \text{ }^\circ\text{C}$, $q_v = 43,5 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \text{ ч})$. Коэффициент использования вентиляции по (3.6) $K'_b = 0,16$. Время работы системы активной вентиляции составляет $\Delta\tau_b = 24 \cdot 0,16 = 3,5 \dots 4,0 \text{ ч/сут}$.

Пример 3.2. В эксплуатируемом картофелехранилище замеренный расход подаваемого в насыпь воздуха составил $L_v = 40 \text{ м}^3/(\text{м}^3 \text{ ч})$.

В период охлаждения $\Delta T_o = 10 \text{ }^\circ\text{C}$; $\Delta z_{\text{ опт}} = 0,04 \text{ }^\circ\text{C/ч}$, явные тепловыделения $q_v = 100 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \text{ ч})$; $\eta_{\text{эф}} = 10^4 \cdot 0,04/100 = 4 \text{ (м}^3 \text{ }^\circ\text{C)}/\text{кДж}$; $K_b = 2 (1 + 0,25 \cdot 4)/(1 + 1,5 \cdot 4,0) = 0,57$; $\Delta\tau_b = 24 \cdot 0,57 = 13,5 \dots 14 \text{ ч/сут}$. Таким образом, в период охлаждения возможно обеспечение температурных параметров в насыпи клубней при наличии в течение суток температуры наружного (или охлажденного искусственно) воздуха $t_n \leq 1,0 \dots 1,5 \text{ }^\circ\text{C}$ не менее $13,5 \dots 14 \text{ ч}$.

Режимы работы систем активной вентиляции буртов картофеля и овощей определяются по той же методике. В связи с неравномерностью воздухораспределения в объемах буртов общее время продувки $\Delta\tau_v$ следует увеличивать на 30...40 %.

Системы вентиляции капустохранилищ. Для кочанов капусты термическое сопротивление верхнего и внутреннего слоев соизмеримы между собой. Следует наряду с внешним теплообменом учитывать явление теплообмена элементов засыпок, что качественно меняет динамику охлаждения насыпи кочанов по сравнению с другими видами сочного растительного сырья.

Особенность охлаждения насыпи кочанов заключается также в повышенной интенсивности испарения (37...45 % от интенсивности смоченных шаров того же диаметра [42]). Испарительное охлаждение снижает температуру поверхности кочанов практически до температуры мокрого термометра $t_{м.т}$ (процесс $t_{к01} \rightarrow t_{м.т}$, $\varphi_p \approx \varphi = 100$ %), когда начальная температура капусты $t_{к01}$ лежит в области *I* ($I_1 > I$) (рис. 3.4). При температуре поверхности кочанов $t_{к02}$, расположенной в области *II*, процесс охлаждения сопровождается понижением температуры по изоэнтальпе до криоскопической t_3 ($t_{к02} \rightarrow t_3$). Охлаждение заканчивается в корректирующем слое, по высоте устанавливается постоянная температура поверхности $t_k \approx t_3$ при температуре приточного воздуха как выше t_3 , так и ниже ее (область *III*), что достаточно убедительно прослеживается на приведенных на рис. 3.5 экспериментально полученных значениях динамики охлаждения насыпи кочанов.

С учетом перечисленных особенностей задача по нахождению текущей температуры поверхности кочана t_k и в центре кочана $t_{kR=0}$ имеет следующую формулировку. На поверхности шара радиусом R при заданных значениях a_k , c_k и ρ_k поддерживается постоянная температура $t_{в0}$, по объему шара действуют равномерно распределенные источники теплоты q_v .

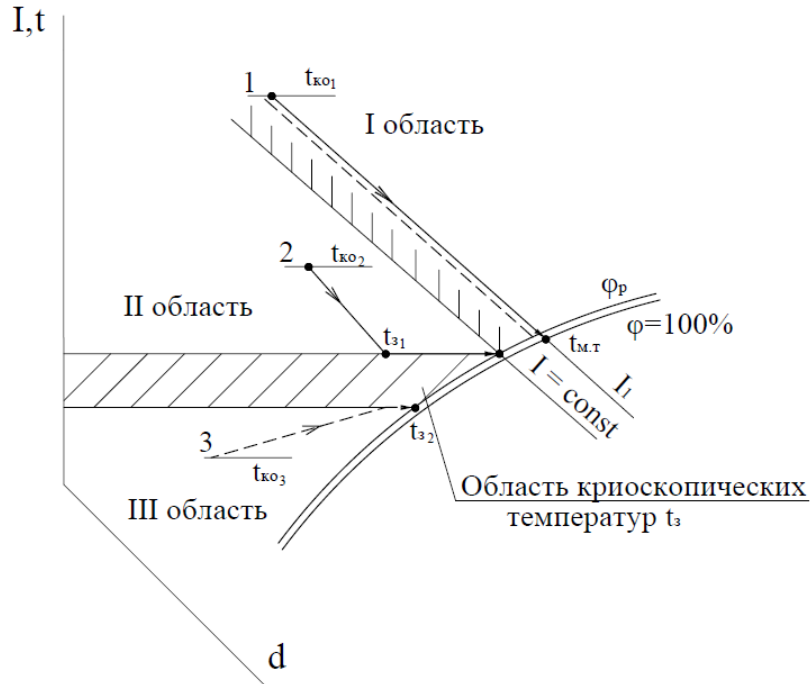


Рис. 3.4. Температура поверхности кочанов в корректирующем слое

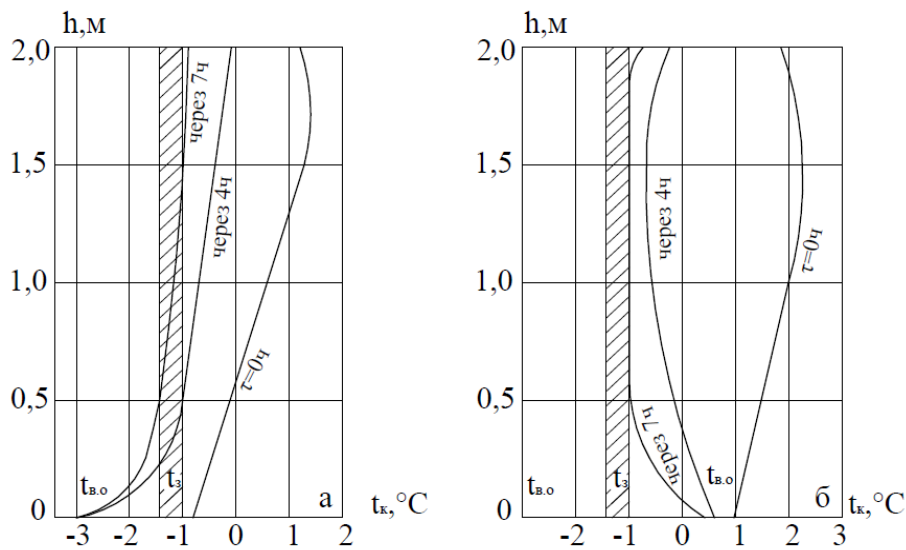


Рис. 3.5. Динамика охлаждения насыпи капусты при удельных расходах воздуха $L = 180 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \text{ ч})$, относительной влажности воздуха $\varphi_{в0} = 80 \dots 85 \%$: а – начальная температура воздуха $t_{в0} = -3 \text{ °C} < t_3$; б – температура воздуха $t_{в0} = 0,5 \text{ °C} > t_3$

Начальная температура шара $t_{к0}$. Необходимо определить температуру в центре шара $t_{кR=0}$ через период времени τ_k .

Применив принцип суперпозиций к кочану как элементу с гомогенными теплофизическими свойствами, найдем решение задачи путем суммирования двух задач при исходных аргументах $Fo = a_k \tau_k / (0,5 d_{cp})^2$; $\eta = r/R$:

одно без учета биологических тепловыделений q_v , но с заданными начальными и граничными условиями (t_1); второй – с источниками тепловыделений, но с нулевыми начальными и граничными условиями (t_q) [66]:

$$t_{kR=0} = t_1 + t_q. \quad (3.8)$$

Первая задача сводится к определению значения параметра θ_t по рис. 3.6 в зависимости:

$$t_1 = t_{\text{во}} + \theta_t (t_{\text{ко}} - t_{\text{во}}). \quad (3.9)$$

Для определения температуры t_q воспользуемся связью между решениями задач с внутренними тепловыделениями и задач с переменными по времени граничными условиями I и III рода:

$$t_q = t_{\text{ад}} - t_t, \quad (3.10)$$

где $t_{\text{ад}}$ – адиабатная температура в теле к моменту времени τ_k (при полном отсутствии теплообмена на поверхности):

$$t_{\text{ад}} = \frac{1}{c_k \rho_k} \int_0^{\tau_k} q_v d\tau = \frac{q_v}{c_k \rho_k} \tau_k. \quad (3.11)$$

Величина t_t представляет собой температуру тела без тепловыделений q_v , когда температура поверхности изменяется по закону, аналогичному (3.11), и находится по зависимости:

$$t_t = t_{\text{во}} + \theta_t b (0,5 d_{\text{ср}})^2 / a_k \quad (3.12)$$

при начальных и граничных условиях:

$$t_{k\tau=0} = t_{\text{ко}}; \quad t_{r=R} = t_{\text{ко}} + b\tau; \quad \left. \frac{\partial t}{\partial \tau} \right|_{\tau=0} = 0.$$

Температурный параметр θ_t определяется по графику (рис. 3.7).

Время достижения насыпью кочанов температур $t_{\text{м.т}}$ или t_3 может быть выражено независимо от значений относительной влажности приточного воздуха при условии $\varphi_{\text{во}} > 75\%$, начального профиля температуры в насыпи в диапазонах расхода воздуха $L = 75 \dots 300 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \text{ ч})$ с погрешностью до 15 % зависимостью:

$$\tau_{\text{н}} = 1,6 \cdot 10^3 x / L. \quad (3.13)$$

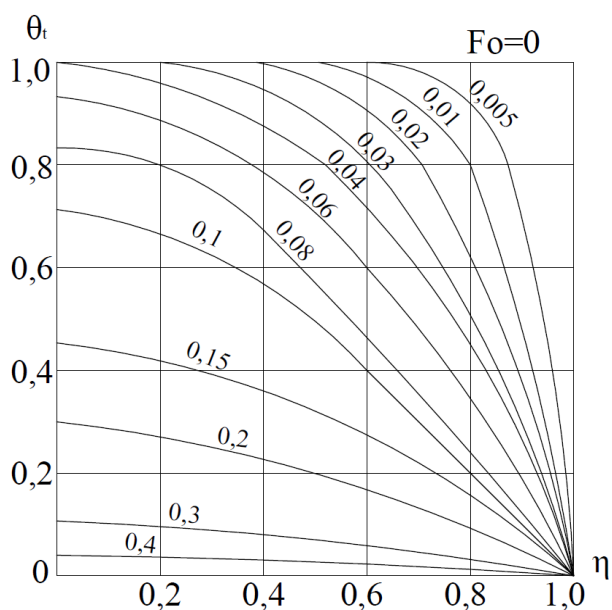


Рис. 3.6. Параметры температуры θ_t в формуле (3.9)

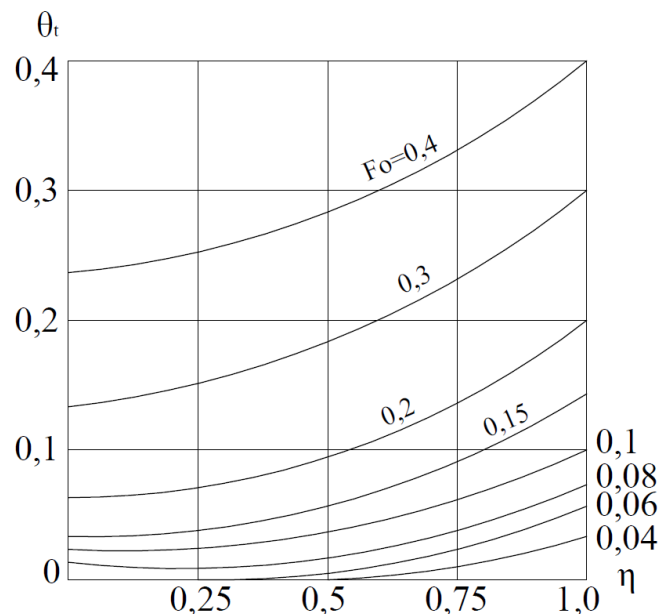


Рис. 3.7. Параметры температуры θ_t в формуле (3.12)

По (3.13) определяется временной сдвиг достижения поверхностью кочанов, расположенных на расстоянии x от сечения входа воздуха, температур $t_{м.т}$ или t_3 . Значения τ_n , ч, по высоте насыпи h даны в табл. 3.1.

Т а б л и ц а 3.1
Время достижения поверхностью кочанов температур $t_{м.т}$ или t_3 , час.

| $L, \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{ч}) / h, \text{ м}$ | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 3,5 | 4,0 |
|------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| 100 | 16,0 | 24,0 | 32,0 | 40,0 | 48,0 | 56,0 | 64,0 |
| 150 | 10,6 | 16,0 | 21,3 | 26,7 | 32,0 | 37,3 | 42,7 |
| 200 | 8,0 | 12,0 | 16,0 | 20,0 | 24,0 | 28,0 | 32,0 |
| 250 | 6,4 | 9,6 | 12,8 | 16,0 | 19,2 | 22,4 | 25,6 |

При новом проектировании или реконструкции систем активной вентиляции хранилищ при заданных значениях h и τ_n находится удельный расход воздуха:

$$L = 1,6 \cdot 10^3 h / \tau_n. \quad (3.14)$$

Решение внутренней задачи сводится к определению времени охлаждения единичного кочана при граничных условиях I рода. Решение этой задачи приведено в примере 3.3.

Пример 3.3. Температура в центре кочана радиусом $R = d_{cp}/2 = 0,1$ м определяется по (3.8). Исходные данные $a_k = 5 \cdot 10^4$ м²/ч; $c_k \rho_k = 4,7 \cdot 700 = 3290$ кДж/(м³ °С); $t_{kr=R} = -1$ °С = const; начальная температура кочана t_{ko} : $-0,5$ °С; $0,0$ °С; $1,0$ °С; $2,0$ °С; $3,0$ °С; $5,0$ °С; $10,0$ °С; расчетное время охлаждения $\tau_{вн}$ = $1,0$ ч.; $2,0$ ч.; $3,0$ ч.; $4,0$ ч.; $6,0$ ч.; $8,0$ ч.; число Фурье $Fo = a_k \tau_{вн} / (0,5d_{cp})^2$. Результаты расчета сводим в табл. 3.2 (в числителе значения t_1 , в знаменателе $-t_q$).

Т а б л и ц а 3.2

Динамика температур на поверхности и в центре $t_{kR=0}$ кочана

| $\tau_{вн}, \text{ч.}$ | Fo | θ_{r1} / θ_q | $t_{ko}, \text{°C}$ | | | | | | |
|------------------------|-------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | | | -0,5 | 0,0 | 1,0 | 2,0 | 3,0 | 5,0 | 10,0 |
| 1 | 0,005 | $\frac{0,97}{0,005}$ | $\frac{-0,52}{0,005}$ | $\frac{-0,03}{0,005}$ | $\frac{0,94}{0,005}$ | $\frac{1,91}{0,005}$ | $\frac{2,88}{0,005}$ | $\frac{4,82}{0,005}$ | $\frac{9,67}{0,005}$ |
| 2 | 0,10 | $\frac{0,71}{0,018}$ | $\frac{-0,65}{0,018}$ | $\frac{-0,29}{0,011}$ | $\frac{0,42}{0,011}$ | $\frac{1,13}{0,011}$ | $\frac{1,84}{0,011}$ | $\frac{3,26}{0,011}$ | $\frac{6,81}{0,011}$ |
| 3 | 0,15 | $\frac{0,44}{0,028}$ | $\frac{-0,78}{0,016}$ | $\frac{-0,56}{0,016}$ | $\frac{-0,12}{0,016}$ | $\frac{0,32}{0,016}$ | $\frac{0,76}{0,016}$ | $\frac{1,64}{0,016}$ | $\frac{3,84}{0,016}$ |
| 4 | 0,20 | $\frac{0,275}{0,06}$ | $\frac{-0,86}{0,024}$ | $\frac{-0,72}{0,024}$ | $\frac{-0,45}{0,024}$ | $\frac{-0,16}{0,024}$ | $\frac{-0,12}{0,024}$ | $\frac{0,68}{0,024}$ | $\frac{2,08}{0,024}$ |
| 6 | 0,30 | $\frac{0,11}{0,13}$ | $\frac{-0,95}{0,04}$ | $\frac{-0,89}{0,04}$ | $\frac{-0,78}{0,04}$ | $\frac{-0,67}{0,04}$ | $\frac{-0,56}{0,04}$ | $\frac{-0,34}{0,04}$ | $\frac{0,21}{0,04}$ |
| 8 | 0,40 | $\frac{0,04}{0,23}$ | $\frac{-0,98}{0,058}$ | $\frac{-0,96}{0,058}$ | $\frac{-0,92}{0,058}$ | $\frac{-0,88}{0,058}$ | $\frac{-0,84}{0,058}$ | $\frac{-0,76}{0,058}$ | $\frac{-0,56}{0,058}$ |
| $\tau_{вн}, \text{ч}$ | Fo | θ_{r1} / θ_q | $t_{kR=0}, \text{°C}$ | | | | | | |
| | | | -0,5 | 0,0 | 1,0 | 2,0 | 3,0 | 5,0 | 10,0 |
| 1 | 0,005 | $\frac{0,97}{0,005}$ | -0,515 | 0,025 | 0,945 | 1,915 | 2,885 | 4,285 | 9,675 |
| 2 | 0,10 | $\frac{0,71}{0,018}$ | -0,639 | -0,279 | 0,431 | 1,141 | 1,851 | 3,271 | 6,821 |
| 3 | 0,15 | $\frac{0,44}{0,028}$ | -0,764 | -0,544 | -0,104 | 0,336 | 0,776 | 1,656 | 3,856 |
| 4 | 0,20 | $\frac{0,275}{0,06}$ | -0,836 | -0,696 | -0,426 | 0,136 | 0,144 | 0,704 | 2,104 |
| 6 | 0,30 | $\frac{0,11}{0,13}$ | -0,91 | -0,85 | -0,74 | -0,63 | -0,52 | -0,30 | 0,25 |
| 8 | 0,40 | $\frac{0,04}{0,23}$ | -0,922 | -0,902 | -0,862 | -0,822 | -0,782 | -0,702 | -0,502 |

Реверсивные системы активной вентиляции. Принципиальная схема реверсивной системы активной вентиляции хранилищ изображена на рисунке 3.8. При ее работе происходит поочередная смена направлений продувок по схемам «снизу вверх» и «сверху вниз» насыпей продукции.

Продувка «снизу вверх». В насыпь сочного растительного сырья 1 вентилятором 2 по приточному воздуховоду 3 подается охлаждающий продукцию воздух.

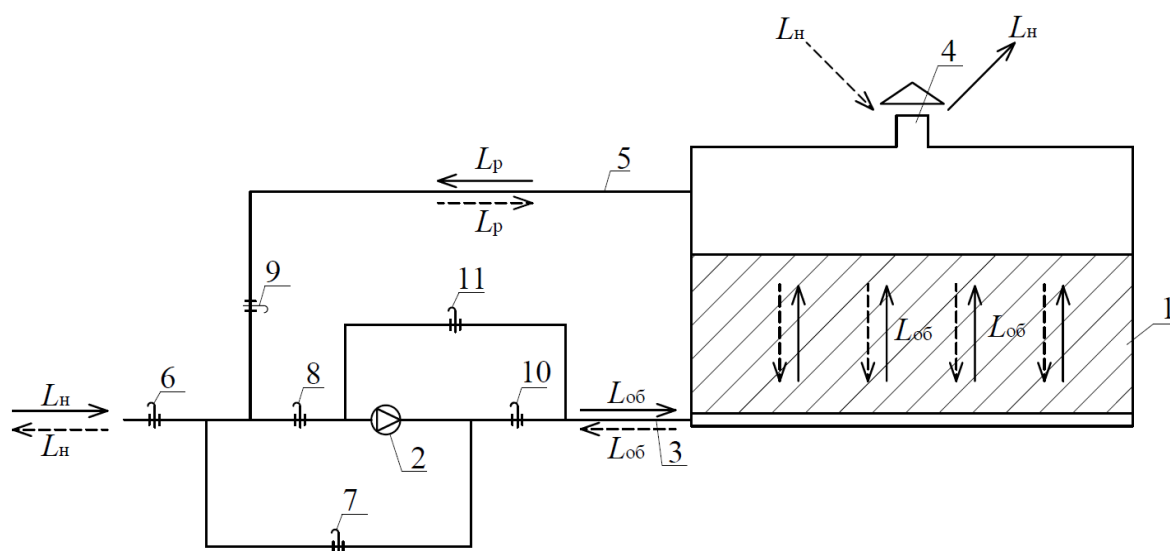


Рис. 3.8. Направления движения воздуха в реверсивных системах активной вентиляции хранилищ: —→ при продувке «снизу вверх»; - - - -> при продувке «сверху вниз»

В период охлаждения происходит прямоточная (без рециркуляции) подача наружного воздуха в насыпь ($L_n = L_{об}$), который полностью удаляется в атмосферу через вытяжную шахту 4. В это время регулирующая арматура (дрессели, шиберы) на приточном воздуховоде 6, 8 и 10 полностью открыты, на остальных воздуховодах 7, 9 и 11 закрыты.

В основной период хранения приготовление приточного воздуха осуществляется путем смешивания минимально необходимого количества приточного воздуха L_n с рециркуляционным L_p , забираемым из хранилища по рециркуляционному воздуховоду 5. В этом режиме эксплуатации реверсивной системы при работе вентилятора 2 арматура 6, 8, 9, 10 откры-

та полностью или частично, а 7 и 11 закрыта. Прошедший через насыпь воздух в количестве $L_n = L_{об} - L_p$ удаляется в атмосферу, остальная часть направляется на рециркуляцию.

Продувка «сверху вниз». В период охлаждения в насыпь поступает полностью наружный воздух в количестве $L_n = L_{об}$. Вентилятором 2 атмосферный воздух забирается через вытяжную шахту 4, проходит через насыпь 1 и удаляется наружу. Открыта запорная арматура 6, 7, 9, закрыта 8, 9, 10.

Основной период хранения характеризуется наличием смешивания наружного (L_n) и рециркуляционного (L_p) воздуха в свободной от продукции верхней части хранилища перед поступлением его в насыпь. Открыты дроссели (шиберы) 6, 7, 9, 10, закрыты 8, 10.

Производительность и режимы работы реверсивных систем активной вентиляции. Проанализируем причины возникновения возможных зон конденсации в верхнем слое насыпи при движении воздуха «сверху вниз». Нагретый в верхнем слое насыпи воздух при контакте с более холодной продукцией нижних слоев может охладиться до температуры точки росы (процесс 1-2') и ниже ее (процесс 1-2'') (рис. 3.9). Конденсация водяных паров не будет наблюдаться при выполнении следующего неравенства (рис. 3.10) [18]:

$$t_{к.маx} - t_{к.миn} \leq \left(\frac{q_v}{\text{Пс}_в \rho_v u} + \frac{q_v}{\alpha_{tv}} \right) + (t_{в.о} - t_{т.р}). \quad (3.15)$$

В правой части неравенства первая скобка показывает перегрев каркаса (продукции) по отношению к воздуху за счет биологических тепловыделений, вторая скобка – начальное состояние воздуха. С уменьшением равновесной относительной влажности в насыпи (ϕ'_p) параметры приточного воздуха смещаются влево (точка 3, рис. 3.9) и температура точки росы ($t'_{т.р}$) понижается (точка 4).

Пример 3.4. Определить условия предотвращения конденсации водяных паров в насыпях картофеля и капусты при продувке «сверху вниз».

Картофелехранилище. Исходные данные: удельные тепловыделения клубней $q_v = 12 \text{ Вт/м}^3$; высоты насыпей $h = 1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0$ и $6,0$ м; параметры приточного воздуха $t_{\text{вo}} = 2,0 \text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi_{\text{вo}} = 95, 90, 85$ и 80% ; удельный расход воздуха $L = 320 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{ч})$, чему соответствует скорость воздуха в слое $u = 0,222 \text{ м/с}$; пористость насыпи $\Pi = 0,4$; удельная массовая теплоемкость воздуха $c_{\text{в}} = 0,279 \text{ Вт}\cdot\text{ч}/(\text{кг }^\circ\text{C})$; плотность воздуха $\rho_{\text{в}} = 1,28 \text{ кг/м}^3$. Коэффициент теплоотдачи насыпи клубней [17] $\alpha_{\text{тв}} = 30 + 1400u \text{ Вт}/(\text{м}^3\text{ }^\circ\text{C})$.

По значениям $t_{\text{вo}}$ и $\varphi_{\text{вo}}$ по $I-d$ -диаграмме определяем температуры точки росы, соответственно, при $\varphi_{\text{вo}} = 95, 90, 85$ и 80% : $t_{\text{т.р}} = 1,6; 1,0; 0,4; -0,2 \text{ }^\circ\text{C}$.

Результаты расчетов по (3.15) сведены в табл. 3.3.

Т а б л и ц а 3.3

Результаты расчетов разности темеператур ($t_{\text{к.маx}} - t_{\text{к.миn}}$) для картофелехранилища

| $\varphi_{\text{вo}}, \%$ / $h, \text{ м}$ | 1,0 | 2,0 | 3,0 | 4,0 | 5,0 | 6,0 |
|--------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 95 | 0,549 | 0,663 | 0,742 | 0,856 | 0,970 | 1,084 |
| 90 | 1,149 | 1,263 | 1,342 | 1,456 | 1,570 | 1,684 |
| 85 | 1,749 | 1,863 | 1,942 | 2,056 | 2,170 | 2,284 |
| 80 | 2,349 | 2,463 | 2,542 | 2,656 | 2,770 | 2,884 |

Капустохранилище. Исходные данные: $q_v = 4,3 \text{ Вт/м}^3$; $h = 1, 2, 3$ м; $t_{\text{вo}} = -1,0 \text{ }^\circ\text{C}$; $\varphi_{\text{вo}} = 97, 95, 90, 85 \%$; удельный расход воздуха $L = 300 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{ч})$; $u = 0,208 \text{ м/с}$; $\Pi = 0,4$; $c_{\text{в}} = 0,279 \text{ Вт}\cdot\text{ч}/(\text{кг }^\circ\text{C})$; $\rho_{\text{в}} = 1,30 \text{ кг/м}^3$; $\alpha_{\text{тв}} \approx 175 \text{ Вт}/(\text{м}^3\text{ }^\circ\text{C})$.

По значениям $t_{\text{вo}} = -1,0 \text{ }^\circ\text{C}$ и $\varphi_{\text{вo}} = 97, 95, 90$ и 85% по $I-d$ -диаграмме определяем температуры точки росы $t_{\text{т.р}} : -1,4; -1,8; -2,5; -3,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Результаты расчетов по (3.15) сведены в табл. 3.4.

Т а б л и ц а 3.4

Результаты расчетов разности темеператур ($t_{\text{к.маx}} - t_{\text{к.миn}}$) для капустохранилища

| $\varphi_{\text{вo}}, \%$ / $h, \text{ м}$ | 1,0 | 2,0 | 3,0 |
|--------------------------------------------|-------|-------|-------|
| 97 | 0,449 | 0,513 | 0,557 |
| 95 | 0,869 | 0,913 | 0,957 |
| 90 | 1,569 | 1,613 | 1,657 |
| 85 | 2,569 | 2,613 | 2,657 |

Полученные в примерах значения разностей температур нагретого (верхнего) и охлажденного (нижнего) слоев насыпей лежат в пределах рекомендуемых биологами диапазонов температур. Таким образом, при хранении сочного растительного сырья в оптимальных и допустимых условиях образования конденсата не будет наблюдаться.

В период охлаждения ($b = 0$) происходит послойное охлаждение насыпей сочного растительного сырья. Скорость перемещения фронта наиболее интенсивного съема температур постоянна при любом направлении

продувки. Основным путем снижения времени и повышения скорости охлаждения продукции является поочередная смена направлений продувок «снизу вверх» и «сверху вниз», при этом экономится около 50 % времени работы систем активной вентиляции. Формула (3.2) для нахождения коэффициента использования вентиляции примет вид:

$$K_B^P = 0,5K_B = 0,5\Delta\tau_B / 24. \quad (3.16)$$

Оптимальные значения расхода воздуха L_v определяются по (3.1). Полученные значения K_B^P (при реверсивной продувке) приведены на рис. 3.2 по оси ординат справа.

Основной период хранения. При реверсивной подаче воздуха в насыпь («сверху вниз») коэффициент использования вентиляции K_B^P имеет вид [15]:

$$K_B^P = 0,5(0,4 q_v / L_v - 3,4 / L_v h). \quad (3.17)$$

Зависимости K_B , K_B^P , L_v , q_v и t'_{xp} как при подаче воздуха «снизу вверх», так и «сверху вниз» при реверсивном цикле работы системы приведены на рис. 3.3.

Пример 3.5. Определить режимы работы прямоточной и реверсивной систем активной вентиляции в эксплуатируемом картофелехранилище. Замеренный расход воздуха $L_v = 40 \text{ м}^3/(\text{м}^3\text{ч})$.

В период охлаждения насыпи $\Delta T_o = 10 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta z_{\text{опт}} = 0,04 \text{ }^\circ\text{C/ч}$, $q_v = 100 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \text{ ч})$, $\eta_{\text{эф}} = 10^4 \cdot 0,04/100 = 4,0 \text{ м}^3 \text{ }^\circ\text{C/кДж}$, $L_{\text{эф}} = 40 \cdot 10/100 = 4,0 \text{ м}^3 \text{ }^\circ\text{C/кДж}$. При продувке насыпи «снизу вверх» $K_B = 2 \cdot (1 + 0,25 \cdot 4) / (1 + 1,5 \cdot 4,0) = 0,57$. Время работы систем активной вентиляции $\Delta\tau_B = 0,57 \cdot 24 = 13,5 \dots 14,0$ часов в сутки. В период охлаждения прямоточная система вентиляции может обеспечить технологические температурные параметры хранения в насыпи клубней при наличии в течение суток $t_n \leq 1,0 \dots 1,5 \text{ }^\circ\text{C}$ не менее 13,0...14,0 часов. Если расчетное $\Delta\tau_B < 13,5 \text{ ч/сут.}$, то при существующей производительности системы требуется искусственное охлаждение приточного воздуха или реконструкция системы активной вентиляции с целью повышения ее воздухопроизводительности.

При реверсивном режиме время работы системы снижается практически вдвое и составляет $\Delta\tau_B = 0,5 \cdot 24 \cdot 0,57 \approx 7$ часов в сутки. В данном случае система удовлетворяет технологическим требованиям к режимам работы, т.к. охлаждение насыпи возможно проводить только в ночные (наиболее холодные) часы ($K_B < 0,3$) без использования искусственных источников холода.

Теоретическо-экспериментальные основы графоаналитического метода расчета интенсивности сушки травы

Расчеты процессов сушки травы с использованием I-d-диаграммы влажного воздуха. Сушка травы представляет собой сложный теплофизический процесс. Можно выделить две основные составляющие, тесно взаимосвязанные между собой: тепло- и влагообмен между продуктом и окружающей средой, протекающий на поверхности материала; перемещение влаги в виде жидкости или пара (и того и другого одновременно) из внутренних слоев материала к его поверхности.

Процесс сушки травы делится на два основных периода (рис. 3.11) [60, 78]: период постоянной скорости сушки – горизонтальная прямая ($N = dw/dt = \text{const}$); период убывающей скорости сушки ($N = dw/dt = \text{var}$). В срезанной траве некоторое время продолжается физиологическая жизнь, сопровождающаяся аэробным дыханием. Отмирание клеток начинается, когда удалена основная масса свободной воды при $w_{\text{тр}} \leq 35 \dots 40 \%$, до этой влажности углубления зоны испарения не наблюдается. Воздух в межклеточниках полностью насыщен, т.е. сушка идет с постоянной скоростью без витального сопротивления. На рис. 3.11 этой влажности соответствует точки перелома линии скорости сушки K1 или K2.

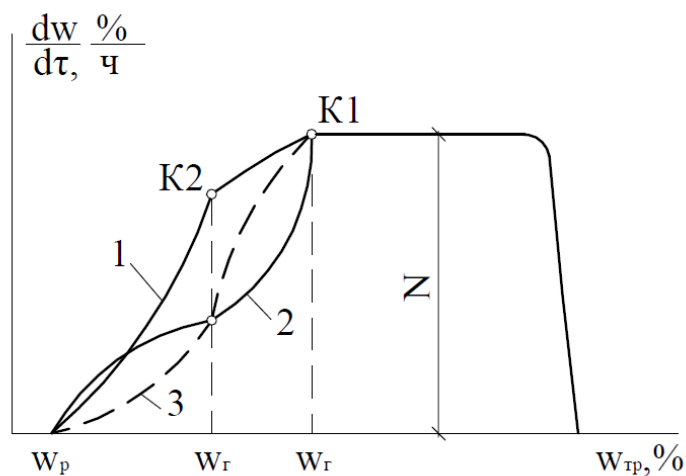


Рис. 3.11. Типичные кривые сушки капиллярно-пористых (1) и коллоидных капиллярно-пористых (2) тел

Интенсивность процессов влагообмена в системе «сохнущая трава-воздух» подчиняется обобщающей закономерности тепломассообмена в слое биологически активного сырья (2.18). Значение коэффициента ε_t для условий сушки травы определяется по (2.82).

Построим на $I-d$ -диаграмме основные процессы, характеризующие интенсивность сушки травы (рис. 3.12).

В точке I заданы параметры приточного воздуха $t_{\text{во}}, \varphi_{\text{во}}, d_{\text{во}}, I_{\text{во}}$. При гипотетическом изотермическом процессе сушки количество поглощаемой воздухом влаги достигает $\Delta d_{\text{max}} = d_2 - d_1$. В реальных условиях при постоянной скорости сушки ($w_{\text{тр}} > w_{\text{г}}$) процесс близок к адиабатному, воздух насыщается влагой до $\varphi_{\text{р}}$. Ассимилирующая способность воздуха при этом процессе $\Delta d_a = d_3 - d_1$. Адиабатность процесса нарушается наличием биологических тепловыделений (1-4), что равнозначно нагреву воздуха на $\Delta t_{\text{во}}$ (1-5). Влагопоглощающая способность воздуха увеличивается до значения $\Delta d_{\text{к}} = d_4 - d_1$.

Когда влажность травы становится ниже гигроскопической ($w_{\text{тр}} < w_{\text{г}}$, падающая скорость сушки) равновесная относительная влажность уменьшается. Влагопоглощающая способность воздуха в корректирующем слое определяется с учетом изотерм десорбции $\varphi_{\text{р1}}$ и равна $\Delta d_{\text{р}} = d_6 - d_1$ (1-6).

Предварительный искусственный нагрев воздуха на Δt (1-7) приводит к возрастанию его влагопоглощения до $\Delta d_{\text{кг}} = d_9 - d_1$, если трава влажная (7-9), или до $\Delta d_{\text{рг}} = d_{10} - d_1$ при ее влажности ниже гигроскопической (7-10). Процесс (7-11) показывает самонагрев травы на $\Delta t_{\text{во}}$.

В основном слое из-за биологических тепловыделений травы продолжается ассимиляция влаги воздухом (4-12). Количество поглощенной влаги $\Delta d_{\text{ос}} = d_{12} - d_4$.

В период дождей параметры наружного воздуха соответствуют точке 3 (в первом приближении изменяются по изоэнтальпе 1-3 до $\phi_n \approx \phi_p \approx 100\%$) и зависят от конкретных погодных условий. Приняв для анализа в период дождей параметры воздуха, соответствующие точке 3, покажем условия, при которых возможно предотвращение увлажнения сохнувшей травы. Когда часть травы уже подсушена, нагрев воздуха до температуры, соответствующей ϕ_{p1} (3-14), не дает положительного эффекта, так как при нагреве наружного воздуха на $\Delta t_d < (t_{14} - t_3)$ контакт его с травой сопровождается ее увлажнением. Только перегрев воздуха выше температуры t_{14} делает его сушильным агентом травы.

Подогрев подаваемого в слой травы воздуха в период дождей требует общего количества теплоты:

$$Q_d = (I_{15} - I_3) L_v \rho_v; \quad (3.18)$$

При этом полезно используемая на сушку часть составляет:

$$Q_{дп} = (I_{15} - I_{14}) L_v \rho_v. \quad (3.19)$$

В формулах (3.18) и (3.19) учитывается только теплота на подогрев наружного воздуха до точки 15. Биологическая теплота дыхания выделяется травой постоянно.

Теоретически минимальный расход воздуха для ассимиляции влаги из травы при постоянной скорости сушки ($w_{тр} > w_r$) $G_{в\text{сг}}$, кг, равен:

$$G_{в\text{сг}} = \frac{10^3 G_{тр} (w_{тр} - w_r)}{(100 - w_r) \Delta d_k} = \frac{10^3 G_c (w_{тр} - w_r)}{(100 - w_{тр}) \Delta d_k}; \quad (3.20)$$

в гигроскопической области сушки ($w_{тр} < w_r$):

$$G_{вг} = \frac{10^3 G_{тр} (w_{тр} - w_r)}{(100 - w_k) \Delta d_p} = \frac{10^3 G_c (w_{тр} - w_r)}{(100 - w_{тр}) \Delta d_p}, \quad (3.21)$$

где $G_{тр}$ и G_c – соответственно, первоначальная масса травы и заготовленного сена, т; Δd_k и Δd_p – влагопоглощающая способность воздуха, г/кг сух. в-ха, согласно рис. 3.12; $w_{тр}$, w_r , w_k – соответственно, первоначальная, гигроскопическая и кондиционная влажности продукции, %.

Минимальное время для получения сена кондиционной влажности τ , ч при непрерывной работе системы активной вентиляции производительностью L_B , м³/ч складывается из продолжительности периода сушки влажной травы τ_1 , ч и периода досушки в гигроскопической области τ_2 , ч:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2, \quad (3.22)$$

где $\tau_1 = G_{B\text{сг}} / L_B \rho_B$; $\tau_2 = G_{B\text{г}} / L_B \rho_B$.

Расчетный расход воздуха системы активной вентиляции ($L_{\text{САВ}}$) необходимо увеличить по отношению к теоретически минимальному из-за несовершенства систем воздухоподдачи $L_{\text{САВ}} = L_B A$. Значения опытного коэффициента A колеблются от $A = 1,20 \dots 1,25$ в сенохранилищах до $A = 2,0 \dots 2,5$ для отдельно стоящих скирд.

Проиллюстрируем методику расчета процессов сушки травы с использованием $I-d$ -диаграммы влажного воздуха конкретным примером.

Пример 3.6. Начальные параметры подлежащей сушке скошенной луговой травы, уложенной в скирду массой $G_{\text{тр}} = 45$ т в один прием, равны: $w_{\text{тр}} = 40$ %, $t_{\text{тр}} = 15$ °С. Им соответствует равновесная относительная влажность воздуха $\phi_p = 93$ % (рис. 1.1б). Параметры атмосферного воздуха (т.1, здесь и далее номера точек по рис. 3.12): $t_{\text{во}} = 20$ °С; $\phi_{\text{во}} = 55$ %.

По $I-d$ -диаграмме определим $d_1 = d_{\text{во}} = 8,2$ г/кг сух. в-ха, $I_1 = I_{\text{во}} = I_3 = 40,7$ кДж/кг, $t_3 = 15$ °С, $d_3 = 10,3$ г/кг сух. в-ха. Установка системы активной вентиляции оборудована вентилятором производительностью $L_B = 70000$ м³/ч.

Ассимилирующая способность воздуха без учета биологических тепловыделений травы составляет $\Delta d_a = d_3 - d_1 = 10,3 - 8,2 = 2,1$ г/кг сух. в-ха.

С учетом данных рис. 2.28 при влажности травы $25 < w_{\text{тр}} < 45$ % ($w_{\text{тр}}^{\text{сп}} = 35$ %) около 25 % воды испаряется за счет теплоты дыхания.

Утилизация теплоты самосогревания составляет $\Delta d_k = d_4 - d_1 = 1,25(d_3 - d_1) = 1,25 \cdot 2,1 = 2,62$ г/кг сух. в-ха.

Влагосодержание воздуха в т. 4 равно $d_4 = d_1 + \Delta d_k = 8,2 + 2,62 = 10,82$ г/кг сух. в-ха. По $I-d$ -диаграмме определим параметры т. 4: $t_4 = 16$ °С; $\phi_p = 93$ %; $I_4 = 43,7$ кДж/кг.

Переход процесса сушки из сверхгигроскопической в гигроскопическую область осуществляется при $w_{\text{тр}} = w_{\text{г}} \approx 31$ %, кондиционная влажность сена $w_{\text{к}} = 19$ %.

Минимальный расход воздуха для ассимиляции влаги из травы от $w_{\text{тр}}$ до $w_{\text{г}}$ (постоянная скорость сушки) по (3.20) $G_{B\text{сг}} = 10^6 \cdot 45(40 - 31)/(100 - 31) \cdot 2,62 = 2,24 \cdot 10^6$ кг.

Масса удаляемой влаги (2.46) $G_{\text{вл}} = 45(40 - 31)/(100 - 31) = 5,79$ т.

Количество воздуха для досушки травы от $w_{\text{г}}$ до $w_{\text{к}}$ (равномерно уменьшающаяся скорость сушки) по (3.21) $G_{B\text{г}} = 2 \cdot 10^6(45 - 5,79)(31 - 19)/(100 - 19) \cdot 2,62 = 4,43 \cdot 10^6$ кг.

Минимальное время для получения сена кондиционной влажности (3.22) $\tau = \tau_1 + \tau_2 = 26,6 + 52,7 = 79,3$ ч, где $\tau_1 = 2,24 \cdot 10^6 / 1,2 \cdot 7 \cdot 10^4 = 26,6$ ч, $\tau_2 = 4,43 \cdot 10^6 / 1,2 \cdot 7 \cdot 10^4 = 52,7$ ч.

Степень необходимого перегрева атмосферного воздуха в период дождей, чтобы при $w_{\text{тр}} = 40\%$ его влагопоглощающая способность осталась, например, та же, т.е. $\Delta d_{\text{д}} = 2,62$ г/кг сух. в-ха, находится следующим образом. На $I-d$ -диаграмме: влагосодержание т. 17: $d_{17} = d_3 + \Delta d_{\text{д}} = 10,3 + 2,62 = 12,92$ г/кг сух. в-ха; $\phi_{17} = 93\%$; $I_{17} = 51,2$ кДж/кг; $t_{17} = 18,5$ °С. Без учета биологической теплоты влагосодержание выходящего из скирды воздуха было бы равно $d_{16} = 12,4$ г/кг сух. в-ха, $t_{16} = 18,2$ °С, $\phi_{16} = 93\%$, $I_{16} = 49,1$ кДж/кг. Проведя через т. 16 изоэнтальпу до пересечения с $d_3 = 10,3$ г/кг сух. в-ха, найдем т. 15: $d_{15} = d_3 = 10,3$ г/кг сух. в-ха; $t_{15} = 23,2$ °С; $I_{15} = 49,1$ кДж/кг; ; $\phi_{15} = 55\%$.

Необходимый искусственный подогрев воздуха в период дождей (по 3.18) на $(t_{15} - t_3) = 23,2 - 15,0 = 8,2$ °С. $Q_{\text{д}} = (I_{15} - I_3)L_{\text{врв}} = (49,1 - 40,7) \cdot 7 \cdot 10^4 \cdot 1,2 = 7,05 \cdot 10^5$ кДж/ч.

Если сохнувшая трава имеет влажность ниже гигроскопической ($w_{\text{тр}} < w_{\text{г}}$), например, $\phi_{\text{р}} = 65\%$ (точка 14), $d_{14} = d_3 = 10,3$ г/кг сух. в-ха, $t_{14} = 17,7$ °С, то непосредственно на сушку расходуется (3.19) $Q_{\text{д.п}} = (I_{15} - I_{14})L_{\text{врв}} = (49,1 - 45,8) \cdot 7 \cdot 10^4 \cdot 1,2 = 2,77 \cdot 10^5$ кДж/ч теплоты. Остальное количество теплоты в количестве $Q_{\text{д.п}} = (I_{14} - I_3)L_{\text{врв}} = (45,8 - 40,7) \cdot 7 \cdot 10^4 \cdot 1,2 = 4,28 \cdot 10^5$ кДж/ч идет на нагрев воздуха с целью уменьшения его относительной влажности, чтобы предотвратить увлажнение сохнувшей травы.

Теоретическо-экспериментальное обоснование и расчет процессов сушки травы с использованием $I-d-\theta$ -диаграммы влажного воздуха.

Потенциал влажности воздуха θ находится по соотношениям (2.55...2.59). Используя известные зависимости параметров влажного воздуха и шкалы потенциалов влажности, на $I-d$ -диаграмму нанесены линии постоянных потенциалов влажности θ и построена $I-d-\theta$ -диаграмма влажного воздуха (рис. 3.13) [13]. При построении численной шкалы потенциала влажности θ принято равновесное влагосодержание фильтровальной бумаги при $t = 20$ °С [10].

М.Н. Кучеренко [18] получены аналитические зависимости по расчету значений потенциалов воздуха, нанесенных на $I-d-\theta$ -диаграмму:

– при относительной влажности воздуха менее 80 % (рис. 3.14)

$$\theta = 1,244 e^{0,219d} \quad (20 < d \leq 30); \quad (3.23)$$

$$\theta = 6,78e^{0,131d} \quad (0 < d \leq 20); \quad (3.24)$$

– при относительной влажности воздуха более 80 %

$$\lg \theta = 0,096 d + 0,082 \quad (20 < d \leq 30); \quad (3.25)$$

$$\lg \theta = 0,057 d + 0,829 \quad (0 < d \leq 20). \quad (3.26)$$

В общем случае с погрешностью до 10 %:

$$\lg \theta = 0,12 d - 0,049 t + 1,056. \quad (3.27)$$

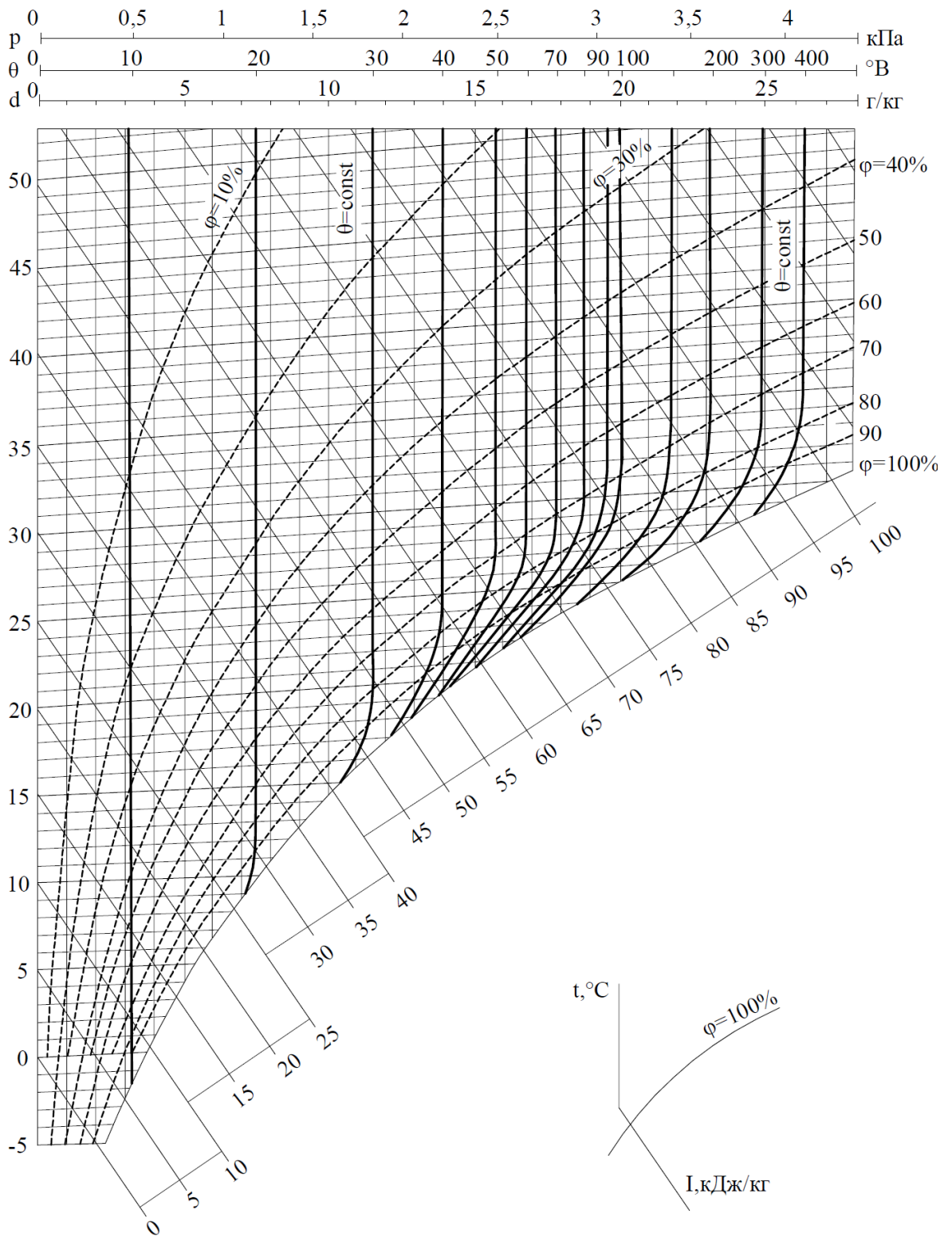


Рис. 3.13. I - d - θ -диаграмма влажного воздуха

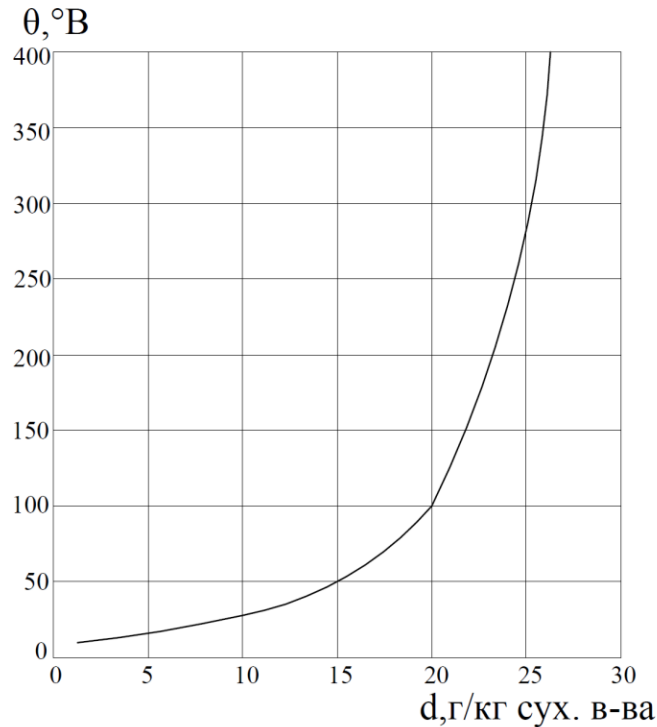


Рис. 3.14. Зависимость потенциала влажности воздуха θ от влагосодержания воздуха d при $\varphi_{\text{в}} < 80\%$

Приведенные данные позволяют сделать вывод о возможности использования $I-d-\theta$ -диаграммы для инженерных расчетов сушки биологически активного сырья. Построение процессов теплообмена между воздухом (сушильным агентом) и сохнущей травой (объектом сушки) на $I-d-\theta$ -диаграмме, изображенных на рис. 3.15, аналогично построению процессов обработки воздуха на $I-d$ -диаграмме.

Влагодоток W , г/ч, от сохнущей травы массой $G_{\text{тр}}$, т, к сушильному агенту (рис. 3.15, процесс $I-4$) составляет согласно (2.60):

$$W = \alpha_{\theta}(\theta_4 - \theta_1)G_{\text{тр}}, \quad (3.28)$$

где θ_1 и θ_2 – соответственно, потенциалы влажности воздуха в начале и в конце сушки, °В.

Потенциал влажности воздуха в слое около поверхности сохнущей травы $\theta_4 = \theta_{\text{пов}}$ зависит от влажности массы и, соответственно, от относительной влажности: при $w_{\text{тр}} < w_{\text{г}}$ $\varphi_{\text{пов}} = \varphi_{\text{р}}$; при $w_{\text{тр}} > w_{\text{г}}$ $\varphi_{\text{пов}} \approx 100\%$. Локальные температуры поверхности травы определяются по уравнению (2.80).

На выходе из корректирующего слоя потенциал влажности воздуха определяется его параметрами в точке B (рис. 2.19). Потенциал в точке B зависит от гигроскопических свойств материала, описанных изотермами десорбции, или может быть рассчитан по зависимостям (3.23...3.25).

В основном слое II (рис. 2.17) разность потенциалов влажности поверхности сырья и воздуха $\Delta\theta$ определяется только разностью температур поверхности травы и воздуха Δt ввиду постоянства относительной влажности воздуха ($\varphi_v = \varphi_p = \text{const}$).

Графическая зависимость коэффициента переноса α_θ , г/(г·ч°В), полученная на основе экспериментальных данных (рис. 2.29), позволяет для аналитического определения его величины с точностью до 10 % использовать следующие выражения:

$$\alpha_\theta = 8,15t + 363 \quad t < 20^\circ\text{C}; \quad (3.29)$$

$$\alpha_\theta = 10,4t + 317 \quad 20 < t < 25^\circ\text{C}; \quad (3.30)$$

$$\alpha_\theta = 23,8t - 27 \quad 25 < t < 30^\circ\text{C}. \quad (3.31)$$

Количество влаги, поглощаемое воздухом, равно:

$$W = G_v (d_4 - d_1), \quad (3.32)$$

где $G_v = L_{уд} G_{тр}$ – расход воздуха, подаваемого в слой травы, кг/ч; $L_{уд}$ – удельный расход воздуха, кг/(г·ч).

Равенство выражений (3.27) и (3.31) позволяет получить значения коэффициента α_θ в конкретных условиях испытаний:

$$\alpha_\theta = L_{уд} (d_4 - d_1) / (\theta_4 - \theta_1). \quad (3.33)$$

Разработанная методика расчета интенсивности и времени сушки с использованием $I-d-\theta$ -диаграммы влажного воздуха позволяет графоаналитическим методом определить величину потенциала влажности воздуха и количества влаги, удаляемой из материала (рис. 3.16).

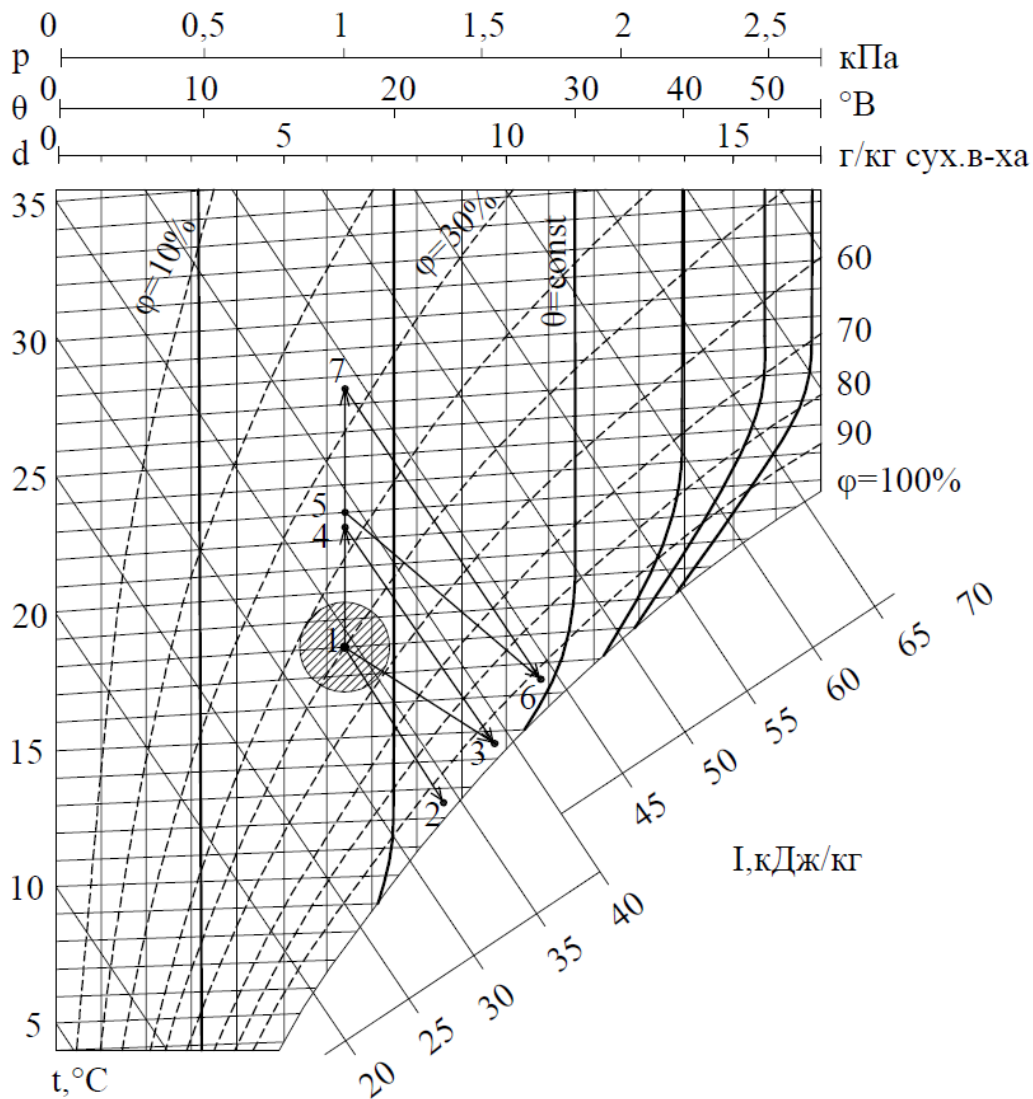


Рис. 3.16. Расчет интенсивности и времени сушки травы с использованием $I-d-\theta$ -диаграммы влажного воздуха

Термодинамические основы формирования параметров микроклимата в теплицах

Холодный и переходный периоды года. Из-за значительных трансмиссионных потерь теплоты в холодный и переходный периоды года, вызванных малым термическим сопротивлением стекла или пленки, удельная тепловая нагрузка теплиц в условиях Московской области составляет около 130 Вт/м^3 [40], т.е. в 5...7 раз больше, чем в зданиях с непрозрачными ограждениями.

Методика определения расхода теплоты на обогрев теплиц, разработанная ГипроНИИсельпромом [72], за расчетный период принимает ночное время, когда потери теплоты максимальные. Уравнение для расчета мощности обогрева теплиц $Q_{от}$ имеет вид (рис. 3.17):

$$Q_{от} = Q_{к}^{ск} + Q_{к}^{ст} + Q_{л}^{ш-ск} + Q_{л}^{в.л-ск} + Q_{л}^{ц-ст} + \sum Q_{и}^{л} + Q_{и}^{п} + Q_{\lambda} + Q'_{инн}. \quad (3.34)$$

В (3.34) $Q_{к}^{ск}$, $Q_{к}^{ст}$ – конвективные тепловые потоки к внутренним поверхностям скатов и стен; $Q_{л}^{в.л-ск}$ – лучистый теплообмен со скатами; $Q_{и}^{п}$, $\sum Q_{и}^{л}$ – теплота, затраченная на испарение влаги с поверхности почвы и листьев; Q_{λ} – теплопотери через грунт; $Q'_{инн}$ – расход теплоты на нагрев инфильтрационного воздуха.

Обогрев теплиц осуществляется водяными системами (рис. 3.17): цокольной ($Q_{ц}$), шатровой ($Q_{ш}$), подпочвенной ($Q_{пп}$), надпочвенной ($Q_{нп}$), а также воздушной системой ($Q_{в}$):

$$Q_{от} = Q_{ц} + Q_{ш} + Q_{пп} + Q_{нп} + Q_{в}. \quad (3.35)$$

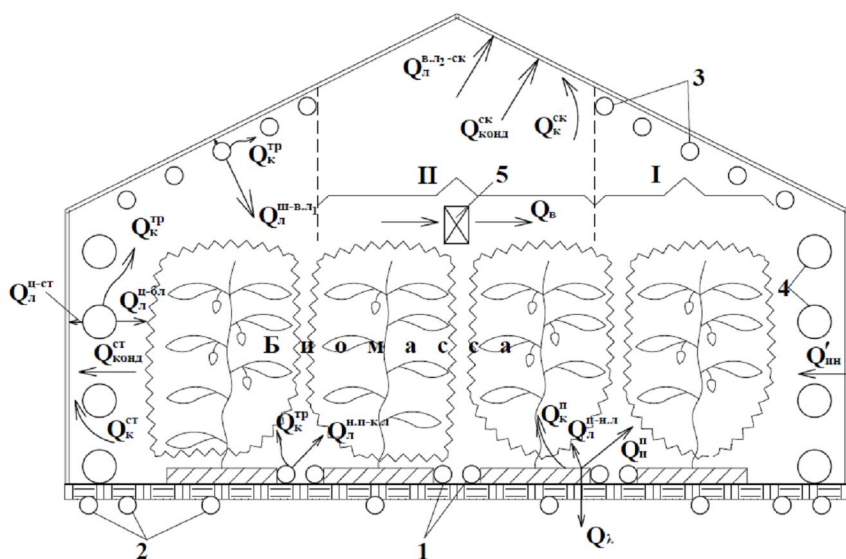


Рис. 3.17. Схема тепловых потоков в зимней теплице при лучисто-конвективном обогреве: 1 – надпочвенном; 2 – подпочвенном; 3 – шатровом; 4 – цокольном; 5 – воздушном; $Q_{к}^{тр}$ – тепловой поток конвекцией от отопительных труб; $Q_{л}^{ш-ск}$, $Q_{л}^{ш-в.л}$, $Q_{л}^{ц-ст}$, $Q_{л}^{ц-б.л}$ – лучистый тепловой поток от труб шатрового обогрева на скат, верхние листья и от труб цокольного обогрева на стену, на боковые листья; $Q_{л}^{нп-н.л}$, $Q_{л}^{п-н.л}$ – лучистый тепловой поток от труб надпочвенного обогрева и от пола на нижние листья

Полный и частичный по элементам расчет каждой из систем отопления приведен в [3, 40, 64, 72]. Проанализируем лишь те особенности термодинамических и теплофизических процессов в объеме теплиц, которые влияют на энергоемкость и эксплуатационные характеристики систем обеспечения параметров микроклимата сооружений.

Мощность *воздушного* отопления Q_v в зависимости от скорости ветра составляет 15...45 % от общей потребности в теплоте.

Мощность систем *шатрового* отопления $Q_{ш}$ находится из условий обеспеченности таяния снега на кровле. Расход теплоты на нагрев кровли $q_{ск}$, Вт/м², зависит от интенсивности снегопада P_c , кг/(м²ч), температуры t_n , °С, и скорости v_n , м/с, наружного воздуха. Для обеспечения наружной температуры поверхности ската $\tau_{ск}^H = 0,5$ °С необходима подача теплоты в количестве [3]:

$$q_{ск} = 45,6 - 6,83 t_n + (94,5 - 0,7 t_n)P_c + (16,2 - 3,6 t_n)v_n. \quad (3.36)$$

Такое количество теплоты должна получать поверхность ската за счет лучистого и конвективного теплообмена с трубами шатрового обогрева и конденсации водяных паров. На эту систему отопления приходится 50...70 % теплоты на обогрев теплицы. Мощность *цокольной* системы отопления примерно равна потерям теплоты через боковые наружные ограждения (от 10 до 15 % общего расхода теплоты в теплице).

Стальные трубы ($d_y = 40...50$ мм) систем *надпочвенного* обогрева одновременно используются в качестве рельс для тележек. Температура теплоносителя (воды) $t_r = 95$ °С, $t_o = 70$ °С.

Мощность *подпочвенного* водяного отопления ($t_r = 45$ °С, $t_o = 30$ °С) при глубине заложения труб $h_{тр} = 0,4$ м и расстоянии (шаге) между ними $S_{тр} = 1,5$ м составляет [3]:

$$Q_{пп} = [32,8\lambda_n + 4,27 - (11,5\lambda_n + 2,9) S_{тр}]F_{пп}, \quad (3.37)$$

где λ_n – коэффициент теплопроводности почвы, Вт/(м·°С); $F_{пп}$ – площадь обогрева подпочвенного отопления теплицы, м².

Конкретные зависимости по определению интенсивности тепловых потоков приводятся в [3, 30, 40, 64, 72].

Конвективный теплообмен. Количество теплоты, полученной или отдаваемой наружными ограждениями, почвой и листьями путем конвекции равно:

$$Q_k = \alpha_k(t - \tau)F. \quad (3.38)$$

Коэффициент конвекции:

$$\alpha_k = A m \sqrt[3]{t - \tau}. \quad (3.39)$$

Коэффициент пропорциональности $A = 1,66$ при $t_b = 20$ °С и $A = 1,69$ при $t_b = 0$ °С. Коэффициент m определяется положением теплоотдающей (тепловоспринимающей) поверхности. Для вертикальных поверхностей (стены, вертикальные листья) $m = 1,0$. В культивационных сооружениях почву при теплотехнических расчетах принято принимать как плоскую поверхность. Для горизонтальных поверхностей, обращенных нагретой стороной вверх или холодной вниз, $m = 1,3$, а обращенных нагретой стороной вниз или холодной вверх $m = 0,7$.

Для вертикальных и горизонтальных листьев суммарный для двух сторон листа тепловой поток конвекцией составляет:

$$Q_k^л = 3,32(t_b^л - \tau_л)^{4/3} f_л, \quad (3.40)$$

где $f_л$ – площадь поверхности листьев, м².

Для скатов коэффициент m выражается соотношением:

$$m = (\sum F_{ct} + 0,7\sum F_{ck}) / (\sum F_{ct} + \sum F_{ck}). \quad (3.41)$$

В.М. Гарбузом [30] для поверхности почвы и ограждений в пленочных укрытиях в условиях обогреваемого грунта получены зависимости:

– для почвы при $\tau_п > t_b^п$

$$Nu = 0,12 (Gr \cdot Pr)^{0,47}; \quad (3.42)$$

– для внутренней поверхности ската при $\alpha = 30^\circ$ и $\tau_b^{ck} < t_b^{ck}$

$$Nu = 0,0104 (Gr \cdot Pr)^{0,59}. \quad (3.43)$$

На наружной стороне стен и кровли наблюдается вынужденная конвекция. При продольном обтекании поверхности воздушным потоком:

$$\text{Nu} = 0,035 \text{Pr}^{0,33} \text{Re}^{0,8}. \quad (3.44)$$

При направлении ветра, перпендикулярном стене, теплообмен зависит только от скорости набегающего потока:

$$\alpha_{\text{к}}^{\text{н}} = 10\sqrt{v_{\text{н}}}. \quad (3.45)$$

Лучистый теплообмен. При расчете теплоотдачи излучением наружных поверхностей ограждений дополнительно учитывается эффективное излучение в пространство:

$$q_{\text{л}}^{\text{н}} = \varepsilon_{\text{пр}} c_0 \varphi_{\text{н.о}} b(\tau_{\text{ст}}^{\text{н}} - t_{\text{н}}) + q_{\text{эф}}. \quad (3.46)$$

В (3.46) принято, что температура поверхностей культивационного сооружения равна температуре наружного воздуха, коэффициент облученности $\varphi_{\text{н.о}} = 1,0$. На рис. 3.18 показана зависимость коэффициента теплообмена излучением, определенного из выражения $\alpha_{\text{л}}^{\text{н}} = q_{\text{л}}^{\text{н}} / (\tau_{\text{ст}}^{\text{н}} - t_{\text{н}})$, от температуры наружной поверхности теплицы [40].

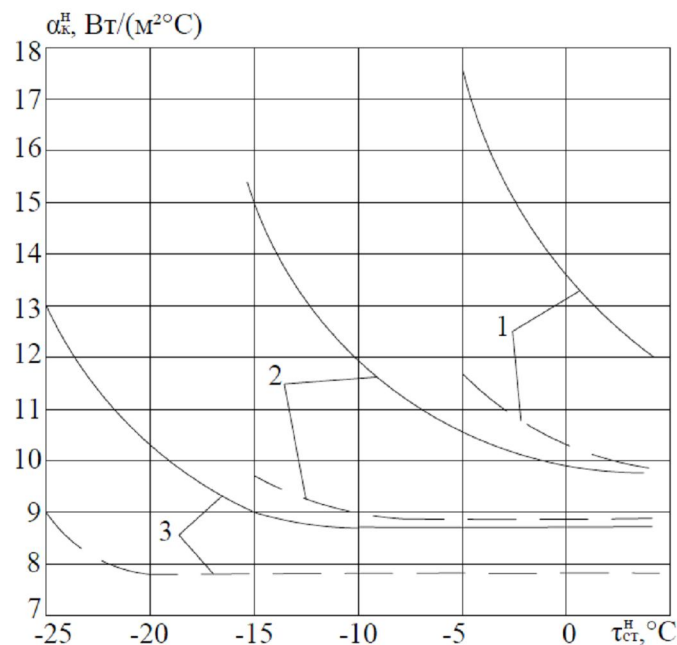


Рис. 3.18. Зависимость $\alpha_{\text{л}}^{\text{н}} = f(\tau_{\text{ст}}^{\text{н}})$ для отдельно стоящего культивационного сооружения: 1, 2, 3 – соответственно, температуры наружного воздуха $t_{\text{н}} = -10$ °C, -20 °C, -30 °C; — — — при облачности $n_0 = 0,5$; - - - - - при сплошной облачности $n_0 = 1,0$

Тепломассообмен при испарении и конденсации. Количество влаги, испаряющейся с поверхности почвы (влажность почвы $\eta = 0,80 \dots 0,85$), равно:

$$G_{\text{и}}^{\text{п}} = \eta \beta' (b_{\text{в}}^{\text{п}} - b_{\text{в}}^{\text{р.з}}) 101,3 F_{\text{п}} / p_{\text{б}}, \quad (3.47)$$

где $b_{\text{в}}^{\text{п}}$ и $b_{\text{в}}^{\text{р.з}}$ – концентрации водяного пара у поверхности почвы при 100%-ном насыщении и температуре почвы в рабочей зоне, г/м³.

В условиях естественной конвекции коэффициент массообмена выражается зависимостью:

$$\beta' = \frac{0,66D}{l} \left(\frac{gl^3}{\nu^2} \frac{\rho_{\text{в}}^{\text{п}} - \rho_{\text{в}}^{\text{р.з}}}{\rho_{\text{в}}^{\text{п}}} \text{Pr}_d \right)^{0,26}, \quad (3.48)$$

где $D = 0,0754$ м²/ч – коэффициент диффузии для водяного пара; $l = \sqrt{F_{\text{п}}}$ – определяющий размер; $\text{Pr}_d = 0,61$ – диффузионный критерий Прандтля;

$\rho_{\text{в}}^{\text{п}} = \frac{353}{\tau_{\text{п}} + 273} \left(1 - \frac{0,378 p_{\text{п1}}}{p_{\text{б}}} \right)$ – плотность воздуха для условий у поверхности

почвы; $\rho_{\text{в}}^{\text{р.з}} = \frac{353}{t_{\text{в}}^{\text{р.з}} + 273} \left(1 - \frac{0,378 p_{\text{п2}}}{p_{\text{б}}} \right)$ – плотность воздуха в рабочей зоне;

$p_{\text{п1}}$ и $p_{\text{п2}}$ – парциальные давления водяных паров у поверхности при 100 %-ном насыщении и температуре почвы и в рабочей зоне.

Количество влаги, испаряющейся с поверхности почвы $G_{\text{и}}^{\text{п}}$ и с растением $\Sigma G_{\text{и}}^{\text{л}}$, по данным [41] составляет 90 % воды, расходуемой на полив. Предполагая равномерность во времени испарения после одноразового полива, принимаем:

$$G_{\text{и}}^{\text{п}} + \Sigma G_{\text{и}}^{\text{л}} \approx 0,9 G_{\text{п.в}} / \tau_{\text{д}}, \quad (3.49)$$

где $\tau_{\text{д}}$ – период между поливами, ч.

Расходуемая на процессы испарения влаги с поверхностей почвы и растений теплота принимается по общеизвестной зависимости $Q_{\text{и}} = 0,278 G_{\text{и}} r$.

Количество конденсирующейся на внутренних поверхностях ограждений влаги зависит от температуры ограждений τ и параметров среды t_B и ϕ_B вблизи ограждений. Зависимости для расчета сконденсировавшейся на внутренних поверхностях боковых ограждений водяных паров приведены на рис. 3.19 [40]. Количество теплоты, полученной ограждениями в результате конденсации водяных паров, составляет $Q_{\text{конд}} = 0,278G_{\text{конд}}r$.

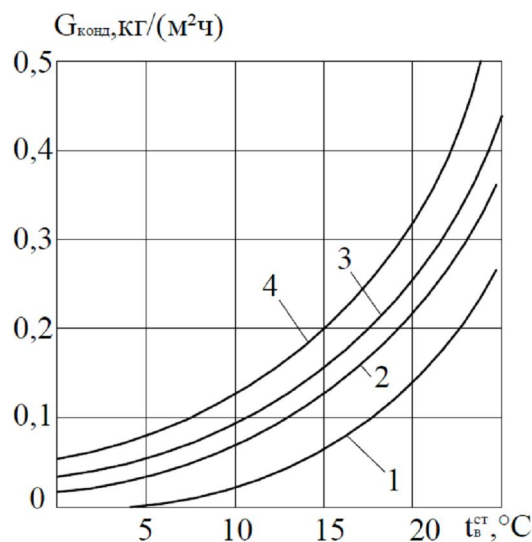


Рис. 3.19. Интенсивность выпадения конденсата на боковых поверхностях в зависимости от температуры воздуха у ограждения:
1 – при 0 °C; 2 – при -10 °C; 3 – при -20 °C; 4 – при -30 °C

Теплопотери через грунт Q_λ . Показано [3], что теплопотери через грунт в теплицах без почвенного обогрева при расчетах по зонам завышены на 15...17 %. Там же аналитически решена задача определения теплового потока через грунт с учетом специфических условий культивационных сооружений, даны зависимости по расчету теплового потока Q_λ и сопротивления теплопередаче почвы. Наибольшие потери теплоты через грунт происходят на расстоянии до 0,4 м от боковых ограждений. На расстоянии 2,0...2,5 м от ограждения тепловой поток стабилизируется и составляет для климатических условий Москвы 6...8 Вт/м².

Теплопотери на нагрев инфильтрующегося воздуха равны:

$$Q'_{\text{ин}} = 0,278G_{\text{ин}}c_B(t_B^{\text{п.3}} - t_H). \quad (3.50)$$

В холодный период года на нагрев инфильтрующегося воздуха затрачивается до 30...50 % теплоты, расходуемой на нагрев помещения.

Термодинамические процессы в объеме теплиц в теплый период года. Динамика изменения состояния воздуха в неветилируемой с закрытыми проемами и фрамугами теплице с растениями в теплый период года показана на $I-d$ -диаграмме влажного воздуха (рис. 3.20).

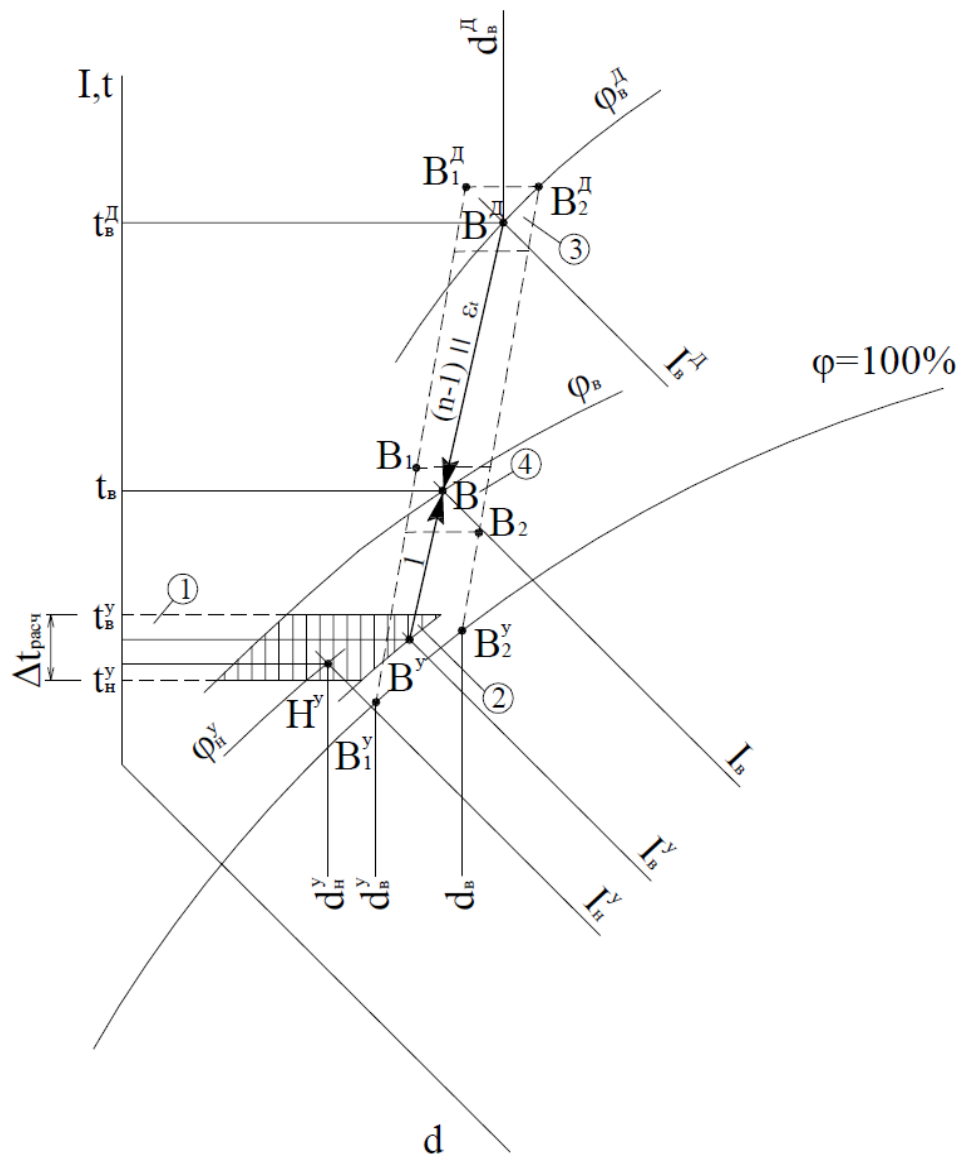


Рис. 3.20. Область саморегулирования микроклимата в теплицах при охлаждении необработанным атмосферным воздухом: 1 – область технологических температур в теплицах; 2 – область температур в предутренние и утренние часы; 3 – область максимальных температур при отсутствии воздухообмена; 4 – область возможных параметров воздуха при вентилировании наружным воздухом

В предутренние и утренние часы температура воздуха в теплице с растениями $t_{\text{в}}^{\text{у}}$ близка или незначительно превышает температуру наружного воздуха $t_{\text{н}}^{\text{у}}$ (т. $H^{\text{у}}$), относительная влажность воздуха $\varphi_{\text{в}}^{\text{у}} \rightarrow 100\%$ (т. $B^{\text{у}}$). На внутренних поверхностях светопрозрачных ограждений наблюдается конденсат. В данный период суток конкретная температура $t_{\text{в}}^{\text{у}}$ может быть ниже, равной или выше расчетной технологической, показанной на рис. 3.20 заштрихованной областью с градиентом температур $\Delta t_{\text{расч}}$.

Точка $B^{\text{д}}$ с параметрами $t_{\text{в}}^{\text{д}}$, $\varphi_{\text{в}}^{\text{д}}$, $d_{\text{в}}^{\text{д}}$, $I_{\text{в}}^{\text{д}}$ показывает состояние воздуха в теплице в дневное время при отсутствии воздухообмена. Температура воздуха $t_{\text{в}}^{\text{д}}$ повышается за счет солнечной радиации и значительно превышает расчетную. Такие температурные условия возникают в климатических условиях средней полосы с середины апреля. Ближе к полудню относительная влажность воздуха $\varphi_{\text{в}}^{\text{д}}$ несколько понижается, хотя его влагосодержание $d_{\text{в}}^{\text{д}}$ повышается за счет испарения растениями и с поверхности почвы.

Параметры внутреннего воздуха (т. B) лежат на линии $B^{\text{у}} - B^{\text{д}}$, являющейся геометрическим положением точек состояния воздуха в невентилируемых помещениях теплиц.

Первым этапом снижения температуры воздуха является естественное организованное проветривание за счет открытия фрамуг. Дальнейшее понижение температуры воздуха достигается при открытии технологических проемов и вытяжных аэрационных шахт. Затем дополнительно включается расположенный в аэрационной шахте вытяжной вентилятор.

Положение точки B на линии $B^{\text{у}} - B^{\text{д}}$ зависит от конкретного времени суток, кратности n , $1/\text{ч}$, воздухообмена в теплице при подаче атмосферного воздуха, способности биомассы саморегулировать параметры микроклимата вблизи точки $B^{\text{д}}$ в дневное время при отсутствии воздухообмена,

вблизи точки B в дневное время при естественном воздухообмене, вблизи точки B^y в утренние часы перед открытием фрагуг для проветривания. Таким образом, область, ограниченная точками $B_1^y - B_1 - B_1^d - B_2^d - B_2 - B_2^y$, характеризует границы области термодинамических процессов состояния воздуха в теплице за счет естественного и механического воздухообменов атмосферного воздуха и саморегулирования растений.

Конкретное местонахождение точки состояния воздуха в теплице (т. B), расположенной на линии $B^y - B^d$, зависит от кратности воздухообмена n . Кратность воздухообмена изменяется от $n = 5 \dots 10$ 1/ч при естественной вентиляции до $n = 25 \dots 30$ 1/ч при механической вентиляции. Месторасположение точки B будет стремиться по линии $B^y - B^d$ к точке B^y в соотношении $1:(n - 1)$.

После исчерпания охладительного эффекта наружного воздуха возникает необходимость в искусственном охлаждении воздуха в теплицах. Такой период времени происходит в течение светового дня, когда суммарная солнечная радиация достигает 450 Вт/м^2 (с мая по октябрь месяцы в средней полосе страны).

На рис. 3.21 показаны процессы изменения состояния воздуха в теплице с биомассой в теплый период года при работе наиболее экономически оправданной системы водоаэрозольного охлаждения. При включении системы (разбрызгивании воды) в объеме теплицы происходит адиабатное охлаждение воздуха по $I_B = \text{const}$ до $\varphi_B = 97 \dots 98 \%$ (на рис. 3.21 процесс условно показан до $\varphi_B = 100 \%$) от температуры t_B до температуры мокрого термометра. Одновременно воздух в теплице повышает влагосодержание от d_B до d_A .

Если количество теплоты солнечной радиации в теплице превышает количество теплоты, поглощенное при испарении капель водяного аэрозоля, то процесс охлаждения прекращается в точке C при температуре t_c , относительной влажности φ_c и влагосодержании d_c .

Понижение интенсивности солнечной радиации во второй половине дня сопровождается снижением температуры воздуха, система водоаэрозольного охлаждения отключается. Параметры внутреннего воздуха переходят в состояние точки B , соответствующей до включения системы адиабатного охлаждения, по лучу $I_b = \text{const}$. Неизбежен именно этот термодинамический процесс, так как теплоемкость оборудования в теплицах незначительна, а растения саморегулируют параметры воздуха вокруг себя в процессе приспособительных реакций при транспирации влаги.

В условиях дневного периода направление луча процесса $\varepsilon_t = \Delta I_T / \Delta G_{\text{исп}}$ определяется по общепринятой методике. Полные тепловыделения в теплице ΔI_T находятся с учетом интенсивности теплопритоков от солнечной радиации. Влаговыведения в теплицах $\Delta G_{\text{исп}} = \Delta d_T \cdot V_T \cdot \rho_v$ складываются из выделений растениями и испарения с поверхности почвы. Угловой масштаб в течение дня является переменной величиной, поэтому и положение точки B на $I-d$ -диаграмме меняется. Рекомендуется принимать в летний период в пик тепловых нагрузок для средней полосы России $\varepsilon_t = 3700 \dots 4800$ кДж/кг.

Тепловой, влажностный и воздушный режимы теплиц в теплый период года. Рассмотрим уточненные составляющие теплового баланса в объеме теплиц, позволившие разработать апробированные практикой режимы эксплуатации комплексных систем снятия перегрева в теплый период года. Получены [18] уточненные системы балансовых уравнений по теплоте и массе влаги и воздуха, описывающие динамику параметров микроклимата в теплице.

Комплексная система снятия перегрева предполагает поочередное включение отдельных ее элементов в период увеличения интенсивности солнечной радиации по периодам года и в течение светового дня. Энергетический и экономический эффекты представленной системы заключаются

в использовании в продолжении длительного периода пассивных (конструктивных) систем обеспечения параметров микроклимата (фрамуги, технологические проемы, аэрационные шахты) и кратковременно включаемых активных элементов систем, основным элементом которых является система водоаэрозольного охлаждения.

Основные схемы потоков полной теплоты $Q_{\text{п}} = Q_{\text{я}} + Q_{\text{скр}}$ приведены на рис. 3.22...3.27 при 6 наиболее характерных режимах работы комплексной системы снятия перегрева и обеспечения параметров микроклимата в теплый период.

На рис. 3.22 рассмотрен *режим I – режим организованного проветривания* и схемы тепловых потоков: открыты форточные фрамуги. Система балансовых уравнений, характерных для режима I, приведены ниже.

$$\begin{aligned} \sum Q_{\text{п}} &= Q_{\text{с.р}} - Q_{\text{тп.о}} - Q_{\text{тп.п}} - (Q_{\text{инф}} + Q_{\text{фр}}) - Q_{\text{скр}} = 0; \\ Q_{\text{с.р}} &= V_{\text{т}} n c_{\text{в}} \rho (t_{\text{н}}^{\text{y}} - t_{\text{в}}); \\ Q_{\text{тп.о}} &= \Sigma F (t_{\text{в}} - t_{\text{н}}) / R_{\text{о}}; \\ Q_{\text{тп.п}} &= F_{\text{п}} (t_{\text{в}} - t_{\text{н}}) / R_{\text{о.п}}; \\ Q_{\text{инф}} + Q_{\text{фр}} &= V_{\text{т}} n c_{\text{в}} \rho_{\text{в}} (t_{\text{в}} - t_{\text{н}}); \\ Q_{\text{скр}} &= V_{\text{т}} n \rho_{\text{в}} (d_{\text{yx}} - d_{\text{пр}}) r / 1000; \\ K_{\text{об}}^{\text{сут}} &= 0,567; K_{\text{об}}^{\text{год}} = 0. \end{aligned} \tag{3.52}$$

На рис. 3.23 приведен *режим II – режим совместной работы систем проветривания и активной аэрации*: открыты форточные фрамуги, технологические проемы и вытяжная аэрационная шахта. В условиях режима II воздухообмен осуществляется за счет притока через фрамуги, технологические проемы $G_{\text{техн}}$, удаление воздуха – через вытяжную шахту $G_{\text{ш}}$. Количество инфильтрующегося воздуха $G_{\text{инф}}$ имеет знакопеременное значение. Поэтому воздушный баланс рассматривается в целом по кратностям воздухообменов в теплице.

Уравнения теплового баланса имеют вид:

$$\Sigma Q_{\Pi} = Q_{c.p} - Q_{тп.о} - Q_{тп.п} - (Q_{ш} + Q_{инф}) - Q_{скр} = 0;$$

$$Q_{ш} + Q_{инф} = V_T n c_v \rho_v (t_v - t_n); \quad (3.53)$$

$$K_{об}^{сут} = 0,6; K_{об}^{год} = 0.$$

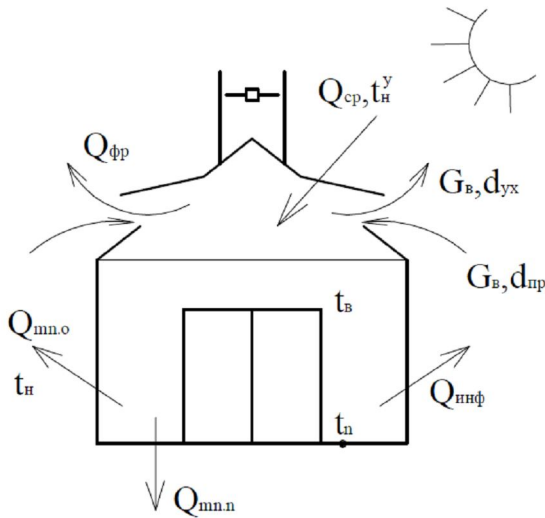


Рис. 3.22. Схема тепловых потоков в теплице в теплый период года при режиме организованного проветривания (режим I)

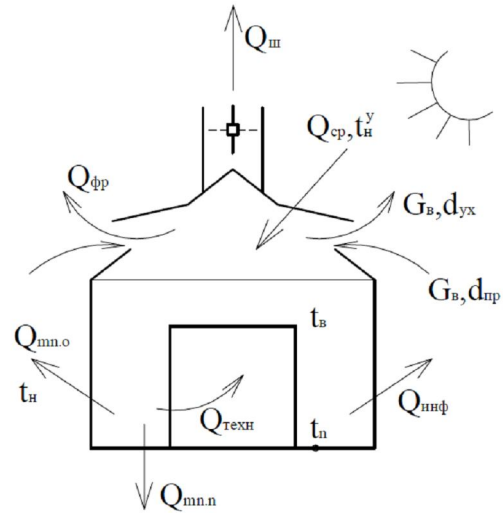


Рис. 3.23. Схема тепловых потоков в теплице при режиме совместной работы систем организованного проветривания и активной аэрации (режим II)

На рис. 3.24 дана *схема тепловых потоков при режиме III*: открыты форточные фрамуги и технологические проемы, работает вытяжной вентилятор, встроенный в вытяжную шахту. Воздух поступает в теплицу через фрамуги $G_{фр}$ и технологические проемы $G_{техн}$ и удаляется вентилятором $G_{вент}$ и частично инфильтрацией $G_{инф}$:

$$\Sigma Q_{\Pi} = Q_{c.p} - Q_{тп.о} - Q_{тп.п} - (Q_{вент} + Q_{инф}) - Q_{скр} = 0;$$

$$Q_{вент} + Q_{инф} = V_T n c_v \rho_v (t_v - t_n); \quad (3.54)$$

$$K_{об}^{сут} = 0,63; K_{об}^{год} = 0,05.$$

Режим IV (рис. 3.25) – *схема тепловых потоков при работе системы водоаэрозольного охлаждения и проветривания*: происходит разбрызгивание воды через форсунки; открыты форточные фрамуги. Технологические проемы и вытяжная аэрационная шахта закрыты.

$$\Sigma Q_{\Pi} = Q_{c.p} - Q_{тп.о} - Q_{тп.п} - (Q_{инф} + Q_{фр}) - Q_{скр} - Q_r = 0; \quad (3.55)$$

$$Q_r = G_{вод} r.$$

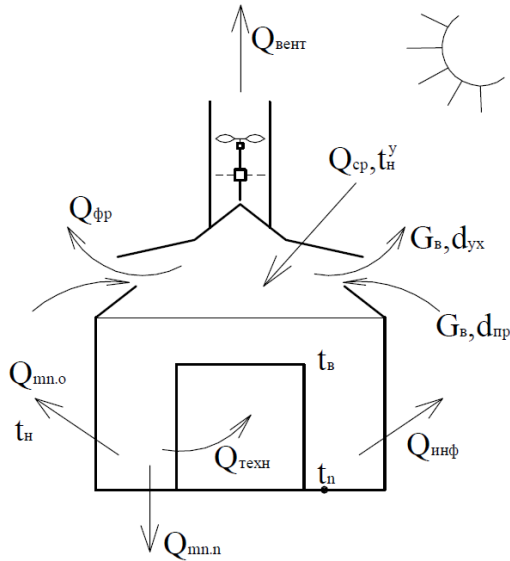


Рис. 3.24. Схема тепловых потоков в теплицах в теплый период года при режиме механической вентиляции с проветриванием (режим III)

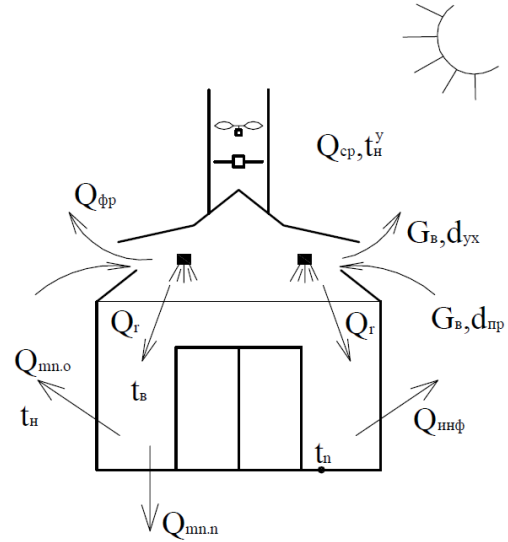


Рис. 3.25. Схема тепловых потоков в теплице в теплый период года при работе системы водоаэрозольного охлаждения и проветривании (режим IV)

На рис. 3.26 показаны схемы тепловых потоков *при работе системы водоаэрозольного охлаждения совместно с проветриванием и активной аэрацией (режим V)*: открыты форточные фрамуги, технологические проемы и вытяжная аэрационная шахта; вытяжной вентилятор выключен. Весь воздух удаляется через шахту $G_{ш}$ и за счет инфильтрации. Приток воздуха осуществляется через технологические проемы $G_{техн}$ и фрамуги $G_{ф}$.

$$\Sigma Q_{п} = Q_{с.р} - Q_{тп.о} - Q_{тп.п} - (Q_{ш} + Q_{инф}) - Q_{скр} - Q_r = 0; \quad (3.56)$$

$$K_{об}^{сут} = 0,833; K_{об}^{год} = 0,25.$$

На рис. 3.27 дана схема тепловых потоков *при совместной работе системы водоаэрозольного охлаждения, механической вентиляции и проветривания (режим VI)*: открыты форточные фрамуги и технологические проемы, работает вытяжной вентилятор. Воздух в теплицу поступает через фрамуги $G_{фр}$ и технологические проемы $G_{техн}$. Удаляется воздух вытяжным вентилятором и частично за счет инфильтрации $G_{инф}$.

$$\Sigma Q_{п} = Q_{с.р} - Q_{тп.о} - Q_{тп.п} - (Q_{вент} + Q_{инф}) - Q_{скр} - Q_r = 0; \quad (3.57)$$

$$K_{об}^{сут} = 1,0; K_{об}^{год} = 1,0.$$

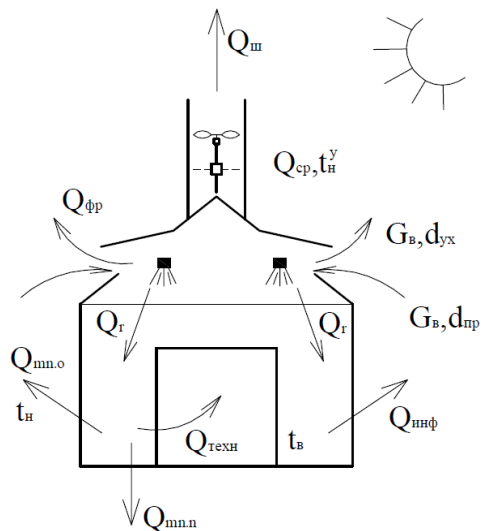


Рис. 3.26. Схема тепловых потоков в теплице в теплый период года при режиме работы СВАО, совместном проветривании и активной аэрации (режим V)

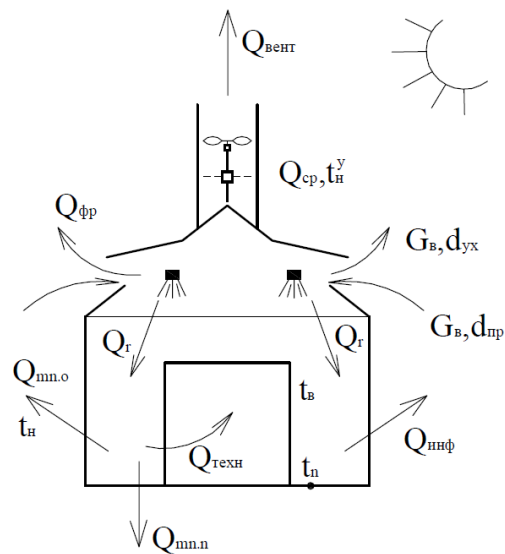


Рис. 3.27. Схема тепловых потоков в теплице в теплый период года при режиме работы СВАО с проветриванием и механической вентиляцией (режим VI)

Условные обозначения к рис. 3.22...3.27, кроме общепринятых: $Q_{с.р}$ – поток теплоты от солнечной радиации в теплицу, Вт; V_T – объем воздуха в теплице, м³; $Q_{тп.о}$ – теплопотери через наружные ограждения, Вт; $Q_{тп.п}$ – теплопотери в почву, Вт; $(Q_{инф} + Q_{фр})$ – расход теплоты на нагрев воздуха, поступающего в теплицу за счет инфильтрации и через открытые фрамуги, Вт; $Q_{ср}$ – расход теплоты на испарение влаги, Вт; $(Q_{ш} + Q_{фр})$ – расход теплоты на нагрев воздуха, поступающего через технологические проемы и фрамуги и удаляемого через аэродинамическую шахту, Вт; $(Q_{вент} + Q_{инф})$ – расход теплоты на нагрев воздуха, поступающего через технологические проемы и фрамуги и удаляемого вытяжным вентилятором и аэрацией, Вт; Q_r – количество теплоты для испарения водяного аэрозоля при работе системы водоаэрозольного охлаждения, Вт, с расходом подаваемой воды $G_{вод}$, кг/ч.

В качестве показателя эффективности снятия перегрева в течение суток ($N = 24$ ч) принят коэффициент обеспеченности систем охлаждения $K_{об}^{сут}$. Его величина показывает долю общего количества часов в течение

суток, не допускающих превышения температуры внутреннего воздуха в теплице относительно расчетной:

$$K_{об}^{сут} = (N - n)/N, \quad (3.58)$$

где n – количество часов превышения температуры воздуха в теплице в течение суток.

На рис. 3.28 и 3.29 показаны обобщенные экспериментально полученные температуры в самый жаркий период солнечного дня. Затемненная часть показывает зону оптимальных температур внутреннего воздуха для выращивания культур. Режим *IV* эксплуатации комплексной системы снятия перегрева не характерен в практических условиях страны и поэтому не изучался.

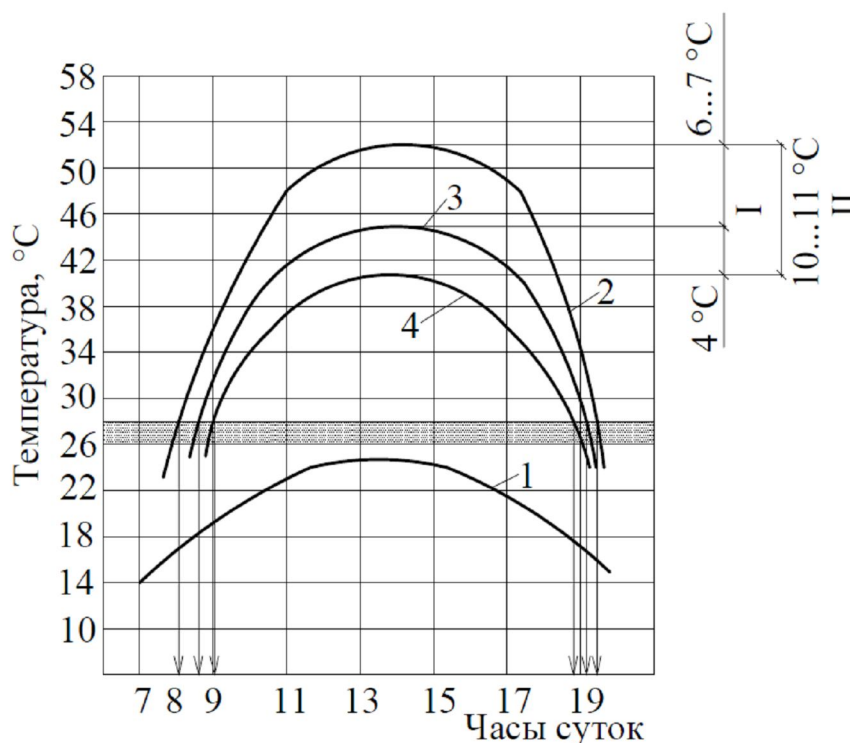


Рис. 3.28. Изменение температуры воздуха в теплице в течение светового дня:
 1 – наружного воздуха; 2 – внутреннего воздуха без работы системы снятия перегрева;
 3 – при работе систем организованного проветривания (режим *I*); 4 – при совместной работе систем проветривания и активной аэрации (режим *II*)

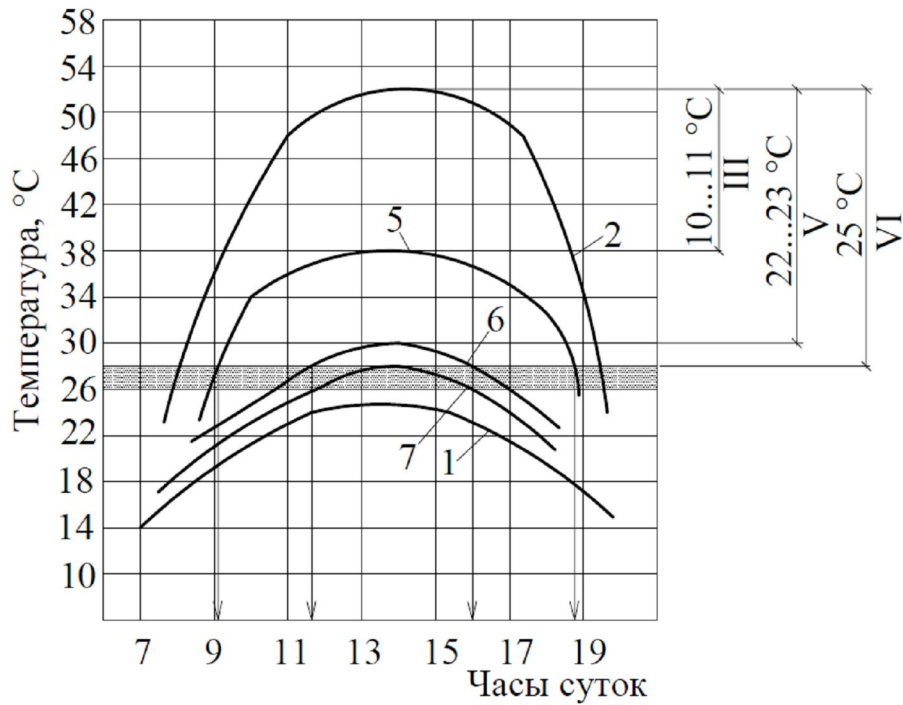


Рис. 3.29. Изменение температуры воздуха в теплице в течение светового дня: 1, 2 – см. рис. 3.28; 5 – при совместной работе систем организованного проветривания и механической вентиляции (режим III); 6 – при совместной работе систем организованного проветривания и систем водоаэрозольного охлаждения (режим V); 7 – при совместной работе систем организованного проветривания, механической вентиляции и систем водоаэрозольного охлаждения (режим VI)

Результаты определения значений $K_{об}^{сут}$ и количественные показатели снижения температуры в каждом из режимов работы комплексной системы снятия перегрева Δt_b приведены в табл. 3.5.

Т а б л и ц а 3.5

Значения $K_{об}^{сут}$ и Δt_b

| Режимы работы | I | II | III | V | VI |
|------------------------------|-------|---------|---------|---------|-------|
| $\Delta t_b, ^\circ\text{C}$ | 6...7 | 10...11 | 14...15 | 22...23 | до 28 |
| $K_{об}^{сут}$, доли | 0,567 | 0,60 | 0,63 | 0,833 | 1,0 |

Коэффициент обеспеченности температурного режима в теплице в годовом цикле $K_{об}^{год}$ необходимо определять для периода года с 1 апреля по 1 августа:

$$K_{об}^{год} = 1 - (N^{год} - n^{год})/N^{год}. \quad (3.59)$$

Количество дней плодоношения (томаты, огурцы) для средней полосы России ≈ 120 суток. Длительность непрерывного поддержания в теплицах в апреле – июле максимально допустимой температуры внутреннего воздуха ($t_v \leq 28 \text{ }^\circ\text{C}$) $n^{\text{год}}$, сут., в зависимости от режимов работы систем поддержания параметров микроклимата находятся по рис. 3.30.

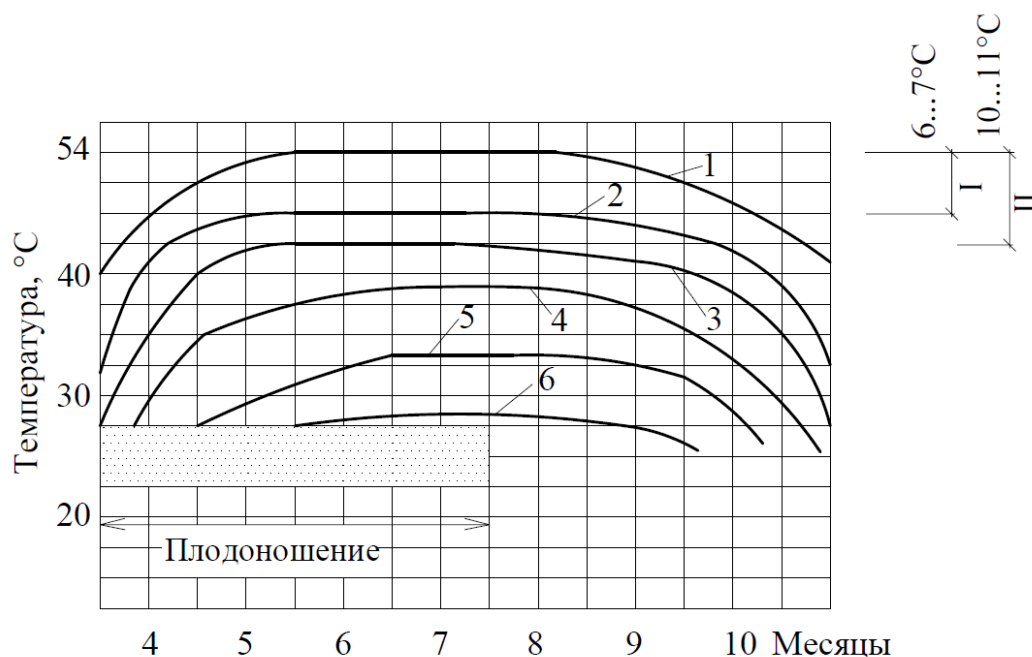


Рис. 3.30. Изменение температуры воздуха в теплице в период плодоношения: 1 – без работы систем снятия перегрева; 2 – режим I; 3 – режим II; 4 – режим III; 5 – режим V; 6 – режим VI

Результаты аналитического определения коэффициентов обеспеченности режимов в годовом цикле эксплуатации для периода плодоношения сведены в табл. 3.6.

Таблица 3.6
Коэффициенты обеспеченности режимов в годовом цикле эксплуатации

| Режимы работы комплексной системы | I | II | III | V | VI |
|-------------------------------------|-----|-----|------|------|-----|
| $N^{\text{год}}$, сут. | 120 | 120 | 120 | 120 | 120 |
| $n^{\text{год}}$, сут. | 0 | 0 | 6 | 60 | 120 |
| $K_{\text{об}}^{\text{год}}$, доли | 0 | 0 | 0,05 | 0,25 | 1,0 |

Заключение

При написании учебного пособия «Тепломассообмен в биологически активных системах (теория сушки и хранения)» авторы из бесконечного многообразия процессов переноса теплоты и влаги выделили и остановились на биологически активных системах, как наиболее сложных и наименее изученных, показали возможные пути упрощения решения задач сопряженного нестационарного тепломассопереноса. Конечным, и особенно важным по мнению авторов, результатом расчетов, является возможность получения практических количественных результатов по совершенствованию тепломассообменных аппаратов, включая снижение энергоемкости систем обеспечения параметров микроклимата в строительной отрасли. Чем сложнее и масштабнее объект исследований в области тепломассопереноса, тем важнее становятся научные методы, позволяющие заранее отбросить недопустимые варианты, часто обоснованные на интуиции, «опыте и здравом смысле», и рекомендовать наиболее удачные. В современном мире техника и технологии меняются настолько быстро, что «опыт» просто не успевает накопиться, а «здравый смысл» легко может обмануть, если он не опирается на научные методы поисков наилучших решений.

Научное обоснование перспективных путей развития техники и управления процессами тепломассопереноса при сушке и хранении возможно только при комплексном учете основных биологических и теплофизических характеристик сохнувшей продукции и хранящегося сочного растительного сырья, знания законов создания и поддержания дифференцированных параметров микроклимата. Это вызывает необходимость дальнейшего углубленного изучения оптимизации объемно-планировочных решений и теплофизических свойств теплового контура зданий, динамики нестационарных процессов тепломассопереноса в объеме помещений, выявления и уточнения движущих сил тепломассопереноса в приня-

той теплофизической модели. Имеющиеся в литературе рекомендации по расчету процессов тепломассообмена в биологически активных системах являются слишком прямолинейными, не учитывающими конкретные условия, экономические, технологические, технические, организационные и экологические аспекты.

Проведен анализ равновесных процессов переноса теплоты и влаги в биологически активных системах на примере сушки травы при заготовке грубых кормов и хранении сочного растительного сырья. Даны определения понятий: термодинамическая система; энтропия; общие законы равновесия; термодинамика неравновесных процессов; термодинамическая движущая сила переноса и др. Показаны формы и энергия связи влаги с биологическим сырьем, необходимость применения при условии термодинамического равновесия изотерм сорбции или десорбции, даны количественные значения величин свободной энергии систем. Подробно рассмотрены физико-механические, аэродинамические и теплофизические характеристики биологически активных сред при сушке и хранении, включая параметры воздушной среды и теплофизические характеристики продукции.

Изучение теплофизических явлений переноса теплоты и влаги в биологически активных системах базируется на разработанной авторами теплофизической модели процессов сушки и хранения, включающей в себя периодичность циклов естественной и вынужденной конвекции в слое, климатические параметры рабочей среды (воздуха), области подобия процессов переноса теплоты и влаги. Приведены конкретные решения задач тепломассопереноса в насыпях сочного растительного сырья при хранении и в слое травы при сушке. Разработаны инженерные методы расчетов режимов работы и производительности систем обеспечения параметров микроклимата хранилищ и установок сушки травы, даны примеры расчетов.

Условные обозначения

- a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$;
- b – градиент температуры по высоте насыпи, $^{\circ}\text{C}/\text{м}$;
- c – удельная теплоемкость, $\text{кДж}/(\text{кг } ^{\circ}\text{C})$, $\text{Вт}\cdot\text{ч}/(\text{кг } ^{\circ}\text{C})$;
- d – влагосодержание воздуха, $\text{г}/\text{кг}$ сух. в-ха; диаметр, м , см ;
- g_v – удельные выделения углекислого газа, $\text{г CO}_2/(\text{т}\cdot\text{ч})$;
- h – высота, м ;
- j, W – масса влаги, ассимилированная воздухом, $\text{г}/\text{ч}$, $\text{кг}/\text{ч}$;
- l – длина; характерный размер, м ;
- p – давление, $\text{Н}/\text{м}^2$; Па ; мм рт. ст. ;
- q_v – удельная теплота дыхания продукции, $\text{Вт}/\text{т}$, $\text{Вт}/\text{м}^3$;
- r – радиус, мм , м ; удельная теплота фазового перехода, $\text{кДж}/\text{кг}$;
- t, T – температура, $^{\circ}\text{C}$, K ;
- u – влагосодержание, $\text{кг}/\text{кг}$; подвижность воздуха в насыпи, $\text{м}/\text{с}$;
- u_{ϕ} – фильтрационная (набегающая на насыпь) скорость воздуха, $\text{м}/\text{с}$;
- v – подвижность (скорость) воздуха, $\text{м}/\text{с}$;
- w – влажность продукции, доли, %;
- D – коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$;
- F – площадь, м^2 ;
- G – общая масса, т ;
- I – энтальпия, $\text{кДж}/\text{кг}$;
- K_v – коэффициент использования вентиляции, доли;
- L – расход воздуха, $\text{м}^3/\text{ч}$; удельный расход воздуха, $\text{м}^3/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$;
- Q – тепловой поток, Вт ;
- R – универсальная газовая постоянная, $R = 8314 \text{ Дж}/(\text{кмоль}\cdot\text{K})$;
- S – энтропия системы, $\text{Дж}/\text{K}$;
- U – напряжение, В ;
- V – объем, м^3 ;

α_t – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²°С);
 α_d, α_θ – коэффициенты массообмена, г/(м²ч·Па), г/(м²ч°В);
 $\beta = 1/273$, 1/град. – коэффициент объемного расширения воздуха;
 ϵ_t – тепловлажностная характеристика процесса изменения состояния воздуха, кДж/кг;
 ϵ_n – доля площади «влажного» участка продукции;
 θ – потенциал влажности, °В;
 λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м°С);
 μ – химический потенциал, Дж/кмоль; коэффициент паропроницаемости, г/(м·с·Па);
 ν – коэффициент кинематической вязкости, м²/с;
 ρ – плотность, кг/м³;
 τ – время, час, с;
 φ – относительная влажность воздуха, доли, %.

Индексы

б – барометрическое; в – внутренний, воздух; вк – вынужденная конвекция; во – начальное состояние воздуха; г – гигроскопический; ек – естественная конвекция; з – замерзание; и – излучение; к – конвекция, каркас насыпи (продукции), кондиционное состояние; ко – начальное состояние продукции; кс – корректирующий слой; л – излучение; м.т – мокрый термометр; н – наружный, насыпной; ос – основной слой; п – полная теплота; пов – поверхность; р – равновесный, давление; р.з – рабочая зона; с – сорбционное состояние, сено; ск – скрытая теплота; т – теплопроводность; тр – трава; э – электроосмос; я – явная теплота; d – диффузионный; t – температура; θ – потенциал влажности.

Критериальные зависимости

Грасгофа (теплообменный): отражает соотношение между силами вязкого трения и подъемной силой

$$Gr_t = \beta g l_t^3 \Delta t / \nu^2;$$

Прандтля (теплообменный): выражает меру подобия полей скоростей и температур

$$Pr_t = \nu / a;$$

Прандтля (диффузионный)

$$Pr_d = \nu / D;$$

Рэлея

$$Ra = Gr_t Pr_t;$$

Нуссельта (теплообменный): характеризует соотношение между конвективным переносом теплоты от жидкости к поверхности тела и переносом теплоты теплопроводностью жидкости толщиной l_o (d_{cp}):

$$Nu_t = \alpha_t d_{cp} / \lambda;$$

Нуссельта (диффузионный):

$$Nu_d = \alpha_d d_{cp} / D;$$

Рейнольдса: характеризует соотношение между инерционной силой и силой внутреннего трения

$$Re = w_o l_o / \nu;$$

Гухмана: T_c и $T_{м.т.}$ - температуры сред по сухому и мокрому термометрам, К:

$$Gu = (T_c - T_{м.т.}) / T_c;$$

Фурье: показывает физическую сущность безразмерного времени:

$$Fo = a_{к\tau} / r^2;$$

Био: используется для нахождения температурного поля в твердом теле:

$$Bi = \alpha_t r_{cp} / \lambda_{к.}$$

Список использованной литературы

1. Алямовский И.Г. Зависимость интенсивности дыхания и тепловыделений плодов и овощей от температуры // Холодильная техника, 1967, №6. – С. 41...42.
2. Алямовский И.Г. Тепло- и массообмен при охлаждении и хранении пищевых продуктов: Автореферат дис.... доктора техн. наук. – Л., 1974. – 33 с.
3. Ануфриев Л.Н., Кожин И.А., Позин Г.М. Теплотехнический расчет сельскохозяйственных производственных зданий. – М.: Стройиздат, 1974. – 216 с.
4. Аэров М.Е., Тодес О.М., Наринский Д.А. Аппараты со стационарным зернистым слоем. – Л.: Химия, 1979. – 176 с.
5. Басин Г.Л. Расчет воздухообменов и температурно-влажностных режимов картофелехранилищ // НИИСантехники. Отопление и вентиляция промышленных и сельскохозяйственных зданий, 1965, сб. №6. – С. 128...147.
6. Берман Л.Д. Испарительное охлаждение циркуляционной водой. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1957. – 320 с.
7. Берман М.И., Календерьян В.А. Тепломассоперенос в плотном продуваемом слое плодов и овощей // ИФЖ, 1986, №2. – С. 266...272.
8. Беннет К.О., Майерс Дж.Е. Гидродинамика, теплообмен и массообмен. – М.: Наука, 1966. – 726 с.
9. Биохимическая термодинамика. – М.: Мир, 1982. – 440 с.
10. Богословский В.Н. Строительная теплофизика.–М.: Высшая школа, 1982.–415 с.
11. Богословский В.Н. Тепловой режим зданий. – М.: Стройиздат, 1979. – 248 с.
12. Богословский В.Н., Абрамов Б.В. К определению потенциала влажности наружного климата // Сб. трудов МИСИ, 1980, вып. 176. – С. 33...41.
13. Богословский В.Н., Гвоздков А.Н. Расчет тепловлагообмена между воздухом и жидкостью с позиции теории потенциала влажности // Вентиляция и кондиционирование воздуха промышленных и сельскохозяйственных зданий. – Рига: Изд-во РПИ, 1986, №18. – С. 25...37.
14. Богословский В.Н., Кокорин О.Я., Петров Л.В. Кондиционирование воздуха и холодоснабжение. – М.: Стройиздат, 1985. – 367 с.
15. Богословский В.Н., Поз М.Я. Теплофизика аппаратов утилизации тепла систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. – М.: Стройиздат, 1983. – 320 с.
16. Бодров В.И. Закономерности влагообмена в насыпи сочного растительного сырья и в слое сохнувшей травы // Вентиляция и кондиционирование воздуха пром. и сельскохозяйств. зданий. – Сб. научных трудов. – Рига, изд-во РПИ, 1987, №19. – С.20...27.
17. Бодров В.И. Хранение картофеля и овощей: Инженерные методы создания и поддержания технологического микроклимата.– Горький: Волго-Вят. кн. изд-во, 1985. – 220 с.
18. Бодров В.И., Бодров М.В., Ионычев Е.Г., Кучеренко М.Н. Микроклимат производственных сельскохозяйственных зданий и сооружений. – Н.Новгород: Издательство ННГАСУ, 2008. – 623 с.
19. Бодров В.И., Бодров М.В., Кучеренко М.Н., Юдинцев А.А. Системы активной вентиляции для сушки биологически активного сырья. – Н. Новгород: ННГАСУ, 2010. – 148 с.

20. Бодров В.И., Громыко Г.Г., Шаранин Ю.И. Учет электроосмоса при влагопередаче через ограждения зданий // Инженерные задачи вентиляции и теплоснабжения на Севере. Сб. научных трудов. – Якутск: ЯГУ, 1986. – С.49...55.
21. Бодров В.И., Фетисов И.А. Заготовка и хранение сена. – Горький: Волго-Вятское кн. изд-во, 1988. – 103 с.
22. Брилинг Р.Е. Миграция влаги в строительных ограждениях // Исследования по строительной физике. – М.: 1949. – 236 с.
23. Бурцев В.И., Позин Г.М., Шуев И.С. Исследование температурного распределения в насыпи продукции с учетом ее тепловыделений и реальной теплопроводности // Труды Гипронисельпрома, 1976, №6. – С. 100...108.
24. Валушис В.Ю. Основы высокотемпературной сушки кормов. – М.: Колос, 1977. – 304 с.
25. Власюк М.П. Численное исследование двумерной естественной конвекции жидкости и газа в слоях однородных и пористых сред: Автореферат дис....канд. физ.-мат. наук. – М., 1974. – 26 с.
26. Волкинд И.Л. Комплексы для хранения картофеля, овощей и фруктов. – М.: Колос, 1981. – 223 с.
27. Волкинд И.Л. О теории тепловлажностных процессов в камерах хранения холодильников // Холодильная техника, 1980, №11. – С.41...42.
28. Волков М.А. Тепло- и массообменные процессы при хранении пищевых продуктов. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. – 272 с.
29. Гамаюмов Н.И. Математическое моделирование процессов тепломассопереноса в капиллярно-пористых телах // Тепломассообмен-VII. Проблемные доклады VII Всесоюзной конференции по тепломассообмену. – Минск, 1985. – С. 101...111.
30. Гарбуз В.М., Фоломеев В.А., Чернышенко В.Г. Теплофизические характеристики тепличных почв // Механизац. и электриф. соц. сельского хозяйства, 1979, №2. – С. 19...20.
31. Гассер, Казими. Возникновение конвекции в пористой среде с внутренними тепловыделениями // Теплопередача, 1976, №1. – С. 51...57.
32. Гинзбург А.С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов. – М.: Пищевая промышленность, 1973. – 528 с.
33. Гинзбург А.С. и др. Теплофизические характеристики пищевых продуктов и материалов. – М.: Пищевая промышленность, 1975. – 223 с.
34. Гирнык Н.Л. Математическое описание тепло- и влагообменных процессов в овощехранилищах // Механизац. и электриф. соц. сельского хозяйства, 1974, №5. – С. 42...44.
35. Главачка В. Определение коэффициента теплообмена в слое шариков квазистационарным циклическим методом // ИФЖ, 1975, т. XXVIII, №4. – С. 604...608.
36. Гоголин А.А. К вопросу о тепловлажностных процессах в камерах холодильников // Холодильная техника, 1979, №6. – С. 44...46.
37. Гоголин А.А. Определение уравнения Льюиса при расчете поверхностных воздухоохладителей // Холодильная техника, 1967, №2. – С. 12...14.
38. Дравининкас А.М. и др. Механизация заготовки кормов: Опыт хозяйств Литовской ССР. – М.: Колос, 1983. – 192 с.

39. Дячек П.И. Исследование и разработка принципов вентиляции картофелехранилищ: Автореферат дис....канд. техн. наук.- Минск, 1979. – 22 с.
40. Егиазаров А.Г. Отопление и вентиляция зданий и сооружений сельскохозяйственных комплексов. – М.: Стройиздат, 1981. – 239 с.
41. Есин В.В. Методика расчета теплового баланса сооружений защищенного грунта // Известия вузов. Архитектура и строительства, 1979, №2.
42. Жадан В.З. Влагообмен в плодоовощехранилищах. – М.: Агропромиздат, 1985. – 197 с.
43. Жадан В.З. Теплофизические основы хранения сочного растительного сырья на пищевых предприятиях. – М.: Пищевая промышленность, 1976. – 238 с.
44. Заключительная редакционная статья по дискуссии о тепловлажностных процессах в камерах холодильников // Холодильная техника, 1981, №7. – С. 55...58.
45. Иванцов Г.П., Любов Б.Я. Прогрев неподвижного слоя шаров потоком горячего газа // Доклады АН СССР, 1952, т. XXXVI, №2. – С. 83...93.
46. Исаченко В.П., Взоров В.В. Массоотдача при испарении воды из пористой стенки, омываемой воздухом // Теплоэнергетика, 1961, №3. – С. 57...61.
47. Какалашвили А.Н., Почхидзе И.Ш. О термодинамической теории тепловлажностных процессов в камерах холодильников // Холодильная техника, 1980, №12.– С. 44...46.
48. Калугина Ю.П. Исследование динамики тепловлажностных процессов и автоматическое регулирование микроклимата картофелехранилищ: Автореферат дис....канд. техн. наук. – М., 1967. – 21 с.
49. Карпис Е.Е. Изменение отношения Льюиса для политропических процессов в форсуночных кондиционерах // НИИСантехники, сб. №15. – М.: Госстройиздат, 1963.– С. 68...81.
50. Кафаров В.В. Основы массопереноса. – М.: Высшая школа, 1962. – 436 с.
51. Кокорин О.Я. Установки кондиционирования воздуха: Основы расчета и проектирования. – М.: Машиностроение, 1978. - 264 с.
52. Коллинз Р. Течение жидкости через пористые материалы. – М.: Мир, 1964. – 350 с.
53. Корма. Справочная книга. – М.: Колос, 1977. – 367 с.
54. Кришер О. Научные основы техники сушки. – М.: ИЛ., 1961. – 539 с.
55. Курылев Е.С., Чижов Г.Б. К вопросу о тепловлажностных процессах в камерах холодильников // Холодильная техника, 1980, №1. – С. 35...37.
56. Лыков А.В. Теория сушки. М.: Энергия, 1986. – 471 с.
57. Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория тепло- и массопереноса. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 535 с.
58. Любарский В.М. и др. Активное вентилирование сельскохозяйственных продуктов. – М.: Колос, 1972. – 152 с.
59. Максимов И.А. Краткий курс физиологии растений. – М.: Гос. изд-во сельхоз. литературы, 1958. – 559 с.
60. Мальтри В., Петке Э., Шнайдер Б. Сушильные установки сельскохозяйственного назначения. – М.: Машиностроение, 1979. – 526 с.

61. Метлицкий Л.В. Биохимия плодов и овощей. – М.: Экономика, 1970. – 272 с.
62. Нестеренко А.В. Тепло- и массообмен при испарении жидкости от свободной поверхности // ЖТФ, 1954, т. XXIV, вып. 4. – С. 729...741.
63. Николаев Л.А. Основы физической химии биологических процессов. – М.: Высшая школа, 1971. – 238 с.
64. НТП 10-95. Нормы технологического проектирования теплиц и тепличных комбинатов для выращивания овощей и рассады.
65. Опхюз Б. Влияние интенсивности вентиляции на потери веса картофеля в вентилируемых картофелехранилищах // Сельское хозяйство за рубежом, 1958, №11. – С. 114...128.
66. Пехович А.И., Жидких В.М. Расчет теплового режима твердых тел. – Л.: Энергия, 1976. – 352 с.
67. Повышение качества и эффективности использования кормов. – М.: Колос, 1983 – 317 с.
68. Промышленное производство кормов: Справочная книга. – М.: Колос, 1981. – 271 с.
69. Пятрушявичус В.И. Основы сушки сельскохозяйственных продуктов методом активного вентилирования: Дисс....доктора технич. наук. – Раудондварис, 1974. – 314 с.
70. Пятрушявичус В.И., Любарский В.И. Активное вентилирование травяных кормов. – Л.: Агропромиздат, 1986. – 96 с.
71. Ребиндер П.А. Физико-химическая механика. – М., 1958.
72. Руководство по теплотехническому расчету культивационных сооружений. – Орел: Гипрониисельпром, 1982. – 173 с.
73. Ри, Дир, Кэтон. Теплообмен естественной конвекцией в слоях индуктивно нагреваемых частиц // Теплопередача, 1978, т. 100, №1. – С. 83...91.
74. Савранский В.М., Хитров А.Н. Механизация сельского хозяйства США. – М.: 1980. – 60 с. – (ВНИИТЭМсельхоз ВАСХНИЛ: Обзорная информация).
75. Сполдинг Д.Б. Конвективный массоперенос. – М.-Л.: Энергия, 1965. – 384 с.
76. Угаров Г.С. Особенности физиологических процессов у организмов при низких положительных температурах. – Якутск: Изд-во ЯГУ, 1979. – 35 с.
77. Уотсон С.Дж, Нэш М.Дж. Приготовление и использование сена и силоса. – М.: Колос, 1964. – 664 с.
78. Фальковский И.М. Сушка и увлажнение лубоволокнистых материалов. – М.: Гизлегпром, 1954. – 403 с.
79. Физиология сельскохозяйственных растений. Том III. Физиология водообмена растений. Устойчивость организмов. – М.: Изд-во Московского университета, 1970, – 654 с.
80. Харитонов В.П. Адсорбция в кондиционировании на холодильниках для плодов и овощей (теория применения). – М.: Пищевая промышленность, 1978. – 192 с.
81. Хоблер Т. Теплопередача и теплообменники. – Л.: Госхимиздат, 1961. – 820 с.
82. Холмквист А.А. Хранение картофеля и овощей. – Л.: Колос, 1972. – 280 с.
83. Хочакава И.А. Технология чая. – М.: Пищепромиздат, 1955. – 146 с.

84. Чайковский В.Ф., Кротов Е.Г. О тепловлажностных процессах в камерах холодильников // Холодильная техника, 1980, №9. – С. 45.
85. Чижов Г.Б. Теплофизические процессы в холодильной технологии пищевых продуктов. – М.: Пищевая промышленность, 1979. – 271 с.
86. Чуклин С.Г., Чумак И.Г., Файнзимберг В.Ф. Современные холодильники для хранения фруктов. – Кишинев: Картя Молдаваняске, 1970. – 171 с.
87. Шкловер А.М. Теплопередача при периодических тепловых воздействиях. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 160 с.
88. Шуев И.С. Расчет интенсивности и времени вентилирования насыпи моркови и столовой свеклы в период охлаждения//Труды Гипронисельпрома, 1976, №7. – С. 163...164.
89. Эккерт Э.Р., Дрейк Р.М. Теория тепло- и массообмена. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 680 с.
90. Atwal A.S. et al. Effects of storage conditions for large round bales on recovery and quality of alfalfa hay // Canadian J. Animal Sci., 1984, v. 64, №2. – P. 487...490.
91. Beukema K.J. et al. Three-Dimensional Natural convection in a Confined Porous Medium with Internal Heat Generation. –Int. J. Heat Mass Transfer, 1983, vol. 26, №3. – P. 451...458.
92. Burton W.G. The basic principles of potato storage practiced in Great Britain. - European Potato Journal, 1973, №6. – P. 77...92.
93. Feldmann F. Trockung und Belüftung Landwirtschaftlicher Produkte. – Landtechnik, 1956, №2. – S. 30...50.
94. Hendrix T. Heat Generated in Chopped Hay and its Relation to the Drying Effect // Agricultural Engineering, 1947, №7. – P. 286...288.
95. Hunter J.H. A simulation model for potato storage ventilation // ASAE Technical paper №78-4061. – 29 p.
96. Hylmö B. et al. The heat balance in a potato pile // Acta agricultural Scandinavica, 1975, v. XXV, №2 – P. 81...87.
97. Johansson S. Nya normer för skulltorkarna // Lantmannen, №7, 1981. – P. 17...19.
98. Lerew L.E. Storage of potatoes a model. – 1978. – 24 p. (Paper ASAE, №78-4059).
99. Lindsay R.T. et al. Ventilation Rates for the Positive Ventilation of Vegetables in Bulk Bins // J. Agric. Eng. Res., 1983, №28. – P. 33...34.
100. Misener G., Mac Donald M. Simulated moisture loss and cooling time for bulk potatoes // Canad. Agr. Eng., 1975, №17. – P. 72...74.
101. Misener G.C., Shove G.C. Moisture Loss from Kennebec Potato Tubers During Initial Storage Period // Transaction of the ASAE, 1976, v. 19, №15, Sept.- Oct. – P. 967...969.
102. Tveitereid M. Thermal convection in a horizontal porous layer with internal heat sources. – Int. J. Heat Mass Transfer, 1977, №20. – P.1045...1050.

Содержание

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Предисловие..... | 3 |
| Введение..... | 6 |
| Глава 1. РАВНОВЕСНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПЕРЕНОСА В БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ СИСТЕМАХ..... | 8 |
| Характеристики насыпей сочного растительного сырья и травы как термодинамических систем..... | 8 |
| Физико-механические и теплофизические характеристики биологически активных сред при хранении и сушке..... | 21 |
| Глава 2. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА ТЕПЛОТЫ И ВЛАГИ В БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ СИСТЕМАХ..... | 27 |
| Физико-математическое описание и решение некоторых задач тепломассопереноса..... | 27 |
| Некоторые решения задач тепломассопереноса..... | 37 |
| Графическое изображение процессов состояния воздуха в биологически активных системах..... | 54 |
| Термодинамическое обоснование потенциала влажности при расчетах интенсивности влагообмена в биологически активных системах..... | 61 |
| Методика расчета потерь влаги сочного растительного сырья на основе потенциала влажности..... | 66 |
| Методика расчета интенсивности влагообмена в слое сохнущей травы на основе потенциала влажности..... | 72 |
| Особенности расчета интенсивности переноса влаги через наружные ограждения..... | 83 |
| Глава 3. ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ТЕПЛОМАССОБМЕНУ В БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ СИСТЕМАХ..... | 90 |
| Теплофизические основы расчета производительности и режимов работы систем обеспечения микроклимата овощекртофелехранилищ..... | 90 |
| Теоретическо-экспериментальные основы графоаналитического метода расчета интенсивности сушки травы..... | 105 |
| Термодинамические основы формирования параметров микроклимата в теплицах..... | 115 |
| Заключение..... | 134 |
| Условные обозначения и индексы..... | 136 |
| Список использованной литературы..... | 139 |
| Содержание..... | 144 |

В. И. Бодров, М.В. Бодров

Тепломассообмен в биологически активных системах
(теория сушки и хранения)

Учебное пособие

Редактор Елизарова С.А.

Подписано к печати _____. Формат 60x90 1/16 Бумага газетная. Печать трафаретная.

Уч. изд. л. _____. Усл. печ. л. _____. Тираж 200 экз. Заказ № _____.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет».

603950, Н.Новгород, Ильинская, 65.

Полиграфцентр ННГАСУ, 603950, Н.Новгород, Ильинская, 65.