

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное агентство по образованию

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»

БОДРОВ В.И., БОДРОВ М.В., КУЧЕРЕНКО М.Н., ЮДИНЦЕВ А.А.

**СИСТЕМЫ АКТИВНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ
ДЛЯ СУШКИ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНОГО СЫРЬЯ**

НИЖНИЙ НОВГОРОД, 2010

УДК 631.365

Рецензенты:

заведующий кафедрой «Теплогазоснабжение и вентиляция» Казанского государственного архитектурно-строительного университета доктор технических наук, профессор В. Н. Посохин;

заведующий кафедрой «Теплогазоснабжение и вентиляция» Тюменского государственного архитектурно-строительного университета доктор технических наук, профессор М. Н. Чекардовский.

БОДРОВ, В.И. Системы активной вентиляции для сушки биологически активного сырья [текст]: учебное пособие / В.И. Бодров, М.В. Бодров, М.Н. Кучеренко, А.А. Юдинцев; под общ. ред. В.И. Бодрова; Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т. – Н.Новгород: ННГАСУ, 2010. – 148 с.; ил. 54.

ISBN

Изложены результаты теоретических и экспериментальных исследований авторов по технологическим, теплофизическим и аэродинамическим основам расчета, проектирования и эксплуатации систем активной вентиляции при сушке травы и хранении сена. Приведены методики расчета количественных характеристик процессов тепломассообмена в слое сохнувшей травы в естественных условиях и при искусственной сушке. Приведенные рекомендации и методики расчетов обоснованы с технологической, теплофизической, энергетической, экономической и экологической точек зрения.

Учебное пособие предназначено для студентов, магистрантов и аспирантов технических и сельскохозяйственных специальностей:

ББК

© Коллектив авторов, 2010
© ННГАСУ, 2010

Введение

Пропорциональное и сбалансированное развитие кормовой базы животноводства может быть достигнуто повышением качества кормов за счет широкого внедрения продуктосберегающих малоэнергетических технологий при их заготовке и хранении. Устойчивое развитие животноводства необходимо для удовлетворения потребностей населения в основных продуктах питания и промышленности в различных видах животноводческой отрасли. Для достижения этих целей нужна прочная кормовая база, требования к которой определяются прежде всего задачами рационального и полноценного кормления животных, обеспечивающего наибольшее количество продукции при наименьших затратах.

К грубым кормам относятся: рассыпное и прессованное сено, силос, сенаж, травяная мука и резка, гранулы и брикеты.

Травяная мука, травяная резка, гранулы и брикеты заготавливаются в чрезвычайно небольших объемах относительно других видов грубых кормов. Процессы приготовления этих продуктов питания животных строго регламентированы разработанными технологиями высокотемпературной сушки на серийно выпускаемом промышленностью оборудовании. Технологии заготовки силоса и сенажа не требуют использования процессов сушки продукции. Поэтому для этих видов грубых кормов в книге приведены только рекомендуемые рациональные технологии заготовок.

Сено – один из основных компонентов питания крупного рогатого скота (КРС), лошадей, овец, коз. Многочисленные попытки заменить сено при зимнем их кормлении силосом, корнеплодами и другими видами сочных кормов не привели к положительным результатам.

Стандартное сено без питательных добавок при скармливании до насыщения способно обеспечить высокую суточную продуктивность коров (до 16 кг), полностью удовлетворяет потребность животных в витаминах. По основным элементам питательных веществ оно считается наиболее выровнен-

ным кормом.

В связи с несовершенством методов уборки и хранения грубых кормов потери питательных веществ в сене достигают 40...50 %. Кажущееся в практических условиях постоянство масс сена естественной и искусственной сушки создает иллюзию экономической выгоды естественной сушки. Однако процесс самосогревания сопровождается резким снижением питательных свойств сена, и этот фактор должен быть обязательно учтен при выборе технологий заготовок.

Основным методом сокращения потерь питательных веществ является применение досушки сена в поле или в хранилищах с целью получения витаминной продукции. Реализация данного мероприятия позволяет значительно улучшить качество кормов и увеличить выход кормовых единиц и перевариваемого протеина.

Для реализации прогрессивных методов заготовки и хранения грубых кормов с использованием для сушки травы систем активной вентиляции следует выявить и обосновать реальные теплофизические и аэродинамические процессы, проходящие в слое биологически активного сырья (сохнущей травы). Основные лабораторные и полупромышленные исследования физико-механических и теплофизических свойств сохнущей травы, динамики процессов теплообмена в слое сохнущей травы при его продувке атмосферным и подогретым воздухом осуществлялись в лаборатории кафедры отопления и вентиляции Нижегородского государственного архитектурно-строительного университета. Натурные испытания проводились в ОПХ «Центральное» Нижегородской государственной областной сельскохозяйственной опытной станции и в сельскохозяйственных предприятиях Нижегородской и Самарской областей.

Авторы выражают искреннюю благодарность рецензентам: д.т.н., профессору В. Н. Посохину и д.т.н., профессору В. М. Чекардовскому за ценные замечания и пожелания, высказанные при рецензировании учебного пособия.

Глава 1. Кормовые, биологические, физико-механические и теплофизические характеристики травы и сена

1.1. КОРМОВЫЕ СВОЙСТВА ТРАВЫ И СЕНА

В период вегетации растений непосредственно скармливается не более 25...30% биологического урожая зеленых кормов. Остальная масса расходуется в стойловый период, длящийся 6...8 месяцев.

В России за единицу меры кормовой ценности кормов принята кормовая единица (КЕ), эквивалентная по питательным свойствам 1 кг овса.

Одной из важнейших задач заготовки зеленых кормов является обеспечение максимального сбора питательных веществ с лугов и посевных площадей и наименьшие их потери при хранении. Эти условия в наибольшей мере удовлетворяет уборка трав в фазе цветения и бутонизации для бобовых и колошения для злаковых с последующей искусственной сушкой. В целях сокращения потерь питательных веществ искусственно высушенная травяная масса должна храниться при соблюдении специальных условий, которые будут проанализированы в книге. При соблюдении этих условий можно сохранить до 90...93% питательных веществ в высушенных кормах от общего количества, содержащегося в исходном сырье (табл. 1.1).

Т а б л и ц а 1.1

Показатели качества высушенных кормов из трав

Наименование показателей	Корм из искусственно высушенной травы	Сено полевой сушки
Общие потери сухого вещества при заготовке и хранении, %	6...12	18...21
Содержание питательных веществ в 1 кг кормов:		
– протеина, г	110...165	75...90
– каротина, мг	120...165	25...37
– кормовых единиц	0,65...0,72	0,35...0,47

Как видно из таблицы, искусственная сушка травы позволяет примерно в два и более раза сократить потери сухого вещества по сравнению с ес-

тественной полевой сушкой.

Экономически целесообразно использовать для производства сырье с высокой кормовой ценностью, т.е. с большим содержанием белка и витаминов. Качество травы определяется по содержанию протеина, каротина и других питательных веществ (табл. 1.2).

Лучшим сырьем для производства искусственно высушенных травяных кормов является люцерна синяя. Наряду с высоким содержанием белка она богата также бета-каротином, зольными элементами, особенно кальцием, и микроэлементами (медь, марганец, молибден, бор, кобальт и др.). Люцерна является поливитаминным кормом. Питательная ценность искусственно высушенной люцерны в стадии бутонизации и цветения достигает 0,85 ... 0,90 КЕ.

В тех районах, где люцерну не выращивают, в качестве основной культуры для производства зеленых кормов искусственной сушки можно использовать клевер красный. Клевер имеет достаточно высокую питательную ценность (0,80...0,85 КЕ на 1 кг сухого вещества), высокое содержание протеина, каротина, а также достаточный комплекс витаминов и микроэлементов.

Качество искусственно высушенных зеленых кормов прежде всего зависит от сроков заготовки травяного сырья. В табл. 1.3 приведены значения химического состава люцерны, клевера красного и тимopheевки луговой по фазам вегетации в процентах от абсолютно сухого вещества. Величина каротина дана в мг на 1 кг.

Как видно из табл. 1.3, кошение трав следует начинать в фазе начала бутонизации бобовых и колошения злаковых, а заканчивать для клевера – до начала цветения, для люцерны – до появления цветков, для злаковых – при полном цветении растений. Недопустимо производство сушеных зеленых кормов из перестоявших трав, т.е. значительно позже цветения растений. Высушенная травяная масса получается некондиционной, с низким содержанием питательных веществ. В этом случае затраты средств, топли-

Таблица 1.2

Питательная ценность и химический состав трав и ботвы корнеплодов

Трава и ботва корнеплодов	Содержание веществ в 1 кг корма, г					Химический состав, %						
	перевари- мого белка	каро- тина	кальция	фос- фора	кормовых единиц	вода	про- теин	белок	жир	клет- чатка	безазотистые экстрактивные вещества	зола
Ежа сборная	9	0,04	1,2	0,8	0,23	68,8	2,3	1,7	0,7	11,3	14,6	2,3
Житняк	15	0,07	2,2	0,9	0,21	69,8	3,0	2,4	1,3	8,9	14,4	2,6
Костер безостый	14	0,06	0,8	0,5	0,21	71,3	3,3	2,7	0,8	9,0	13,2	2,4
Лисохвост	11	0,04	3,5	3,2	0,19	72,8	4,2	3,3	1,0	6,9	12,5	2,6
Мятлик луговой	16	0,03	1,9	1,5	0,23	71,2	3,8	3,0	1,6	7,4	14,3	2,3
Овсяница луговая	8	0,07	1,3	1,2	0,21	70,9	2,7	2,1	0,9	8,6	14,4	2,5
Райграс	12	0,04	1,1	1,0	0,20	73,2	3,4	2,5	0,9	8,0	12,3	2,2
Рапс	20	0,03	20,	0,5	0,16	78,8	4,9	3,4	0,8	3,9	8,3	3,3
Суданская трава	6	0,06	1,7	0,6	0,17	76,4	2,9	2,2	0,6	7,0	10,9	2,2
Тимофеевка	9	0,04	1,7	0,9	0,21	68,3	2,7	2,2	0,9	10,1	16,3	1,7
Вика	24	0,05	1,97	0,69	0,16	78,2	5,0	4,0	0,8	5,2	9,0	1,8
Донник белый	19	0,04	3,0	0,8	0,17	77,0	3,9	2,9	0,7	6,8	9,7	1,9
Клевер красный	21	0,04	3,8	0,7	0,21	77,8	3,7	3,1	0,9	5,0	10,7	1,9
Клевер шведский	17	0,02	3,4	0,5	0,17	77,8	3,8	3,0	0,7	6,1	9,9	1,7
Отава клевера	26	0,07	3,0	0,7	0,21	76,6	4,7	3,8	0,9	5,7	9,5	2,6
Люцерна синяя	24	0,05	6,4	0,6	0,17	76,4	4,8	3,6	0,7	6,2	9,6	2,3
Отава люцерны	24	0,06	3,8	0,5	0,18	76,0	4,5	3,6	0,7	6,2	10,2	2,4
Сераделла	17	0,06	2,7	0,5	0,17	73,7	4,0	3,1	1,2	8,5	10,6	2,0
Эспарцет	22	0,07	2,4	0,6	0,17	76,8	4,2	3,6	1,0	5,4	10,7	1,9
Крапива	18	0,09	3,6	2,2	0,19	76,0	4,6	3,8	0,9	4,8	9,7	4,0
Клевер + тимофеевка	14	0,03	3,5	0,9	0,22	74,0	3,1	2,5	0,7	7,14	13,2	1,6
Ботва турнепса	11	0,03	2,3	0,1	0,11	85,8	2,3	1,6	0,4	2,2	6,3	3,0
Ботва картофеля	12	0,08	3,3	0,7	0,10	80,2	3,6	2,8	0,7	3,9	7,8	3,8
Ботва моркови	17	0,07	5,3	0,6	0,17	78,8	3,6	2,8	0,8	3,1	10,4	3,3
Ботва сахарной свеклы	17	0,03	1,6	0,4	0,19	73,5	3,1	2,5	0,8	3,2	9,6	5,8

Т а б л и ц а 1.3

Химический состав в различные периоды вегетации травы

Химический состав	Люцерна			Клевер красный			Тимофеевка луговая		
	Бу-тон.	Нач. цвет..	Полн. цвет.	Бу-тон.	Нач. цвет	Полн. цвет.	Бу-тон.	Нач. цвет	Полн. цвет.
Протеин	19,5	16,8	16,2	20,5	18,1	17,4	13,9	9,3	8,1
Сырой жир	2,5	2,4	2,2	3,2	3,0	2,7	2,9	2,7	2,2
Сырая клетчатка	25,4	29,1	31,2	24,9	26,5	25,3	29,6	26,5	28,6
Зола	11,3	10,6	8,4	6,5	6,7	7,1	6,4	6,1	5,9
Каротин	206	170	127	228	175	160	155	93	82

ва и энергии на производство зеленых кормов искусственной сушки в виде травяной муки, гранул, брикетов экономически не будет целесообразно.

Сено является важнейшим кормом для организации полноценного кормления скота в зимний период. В 1 килограмме хорошего лугового сена содержится 0,42...0,48 кг кормовых единиц, 48...55 грамм перевариваемого протеина, 40...55 миллиграмм каротина. Кроме того, сено богато витаминами комплекса В, витаминами групп Д, Е, К, минеральными веществами, гормонами и другими биологически активными веществами. Протеин сена отличается высокой биологической полноценностью. В связи с этим трудно переоценить значение сена в рационах молодняка крупного рогатого скота и коров в зимне-весенний период.

Однако качество сена зачастую остается неудовлетворительным. Одна из причин этого – запаздывание с оптимальными сроками уборки трав, что увеличивает содержание клетчатки, в этих условиях в корме почти полностью исчезают витамины. Другая причина – нарушение технологии сушки травы, в связи с чем теряются листья и соцветия, в которых содержатся ценные питательные вещества.

Создание и наличие страхового фонда соломы должно быть непременным условием в работе каждого хозяйства. Учитывая опыт засушливых лет, когда остро ощущается дефицит кормов, необходимо решить в обязательном порядке вопрос создания запаса соломы на кормовые цели. Скармливание соломы коровам даже при высоком уровне молочной продуктивности может покрывать до 15% их потребности в энергии. В кормо-

вых рационах телок содержание соломы может быть еще выше. Солому можно использовать и для откорма молодняка крупного рогатого скота.

В зависимости от материально-технической базы в хозяйствах при заготовке, хранении и подготовке к скармливанию могут быть использованы различные варианты технологии. Например, скирдование соломы в полевых условиях, прессование соломы на пресс-подборщиках, укладка соломы в крупноблочные скирды на длительное хранение.

Силос является одним из основных объемных кормов для жвачных животных в зимне-весенний период года. Оптимальные сроки уборки культур на силос приведены в табл. 1.4.

Т а б л и ц а 1.4

Оптимальные сроки уборки культур на силос

Культура	Оптимальная фаза для скашивания на силос
Кукуруза	Молочно-восковая спелость
Подсолнечник	Начало и до полного цветения
Вико-овсяные, горохо-овсяные смеси	Восковая спелость бобов 1...2 нижних ярусов
Многолетние злаковые травы	Начало колошения
Многолетние бобовые травы	В фазе бутонизации
Рапс озимый	Бутонизация, начало цветения
Ботва картофеля	За 2...3 дня до уборки клубней
Свекольная ботва	Обычные сроки уборки корнеплодов

Силос считается первоклассным, если в нем содержится не менее 25% сухого вещества, 12 % протеина, 17...25 мг/кг каротина, обычно не более 15 % золы (в расчете на сухое вещество). Из общего количества органических кислот на долю молочной и уксусной приходится соответственно 60 и 40%.

В настоящее время разработаны приемы совместного силосования зеленой массы крупностебельных культур с измельченной соломой, которую можно добавлять в пределах 10...25 % от силосуемой массы. Введение соломенной резки следует рассматривать как один из наиболее доступных и экономичных способов подготовки соломы к скармливанию.

Повысить качество силоса можно путем использования химических консервантов в процессе закладки сырья. Химические консерванты целесо-

образно применять для высоковлажного несилосующегося (люцерна, ботва картофеля) и трудносилосующегося (многолетние и однолетние бобовые и злаковые травы, их смеси). Нормы внесения химических консервантов устанавливаются в зависимости от вида сырья (табл. 1.5).

Т а б л и ц а 1.5

Доза консервантов на 1 тонну зеленой массы

Консерванты	Силосуемая масса		
	несилосующаяся	трудносилосующаяся	легкосилосующаяся
Муравьиная кислота, л	5	4	3
Уксусная кислота, л	-	5	5
Препарат КНМК, л	5	4	3
Бензойная кислота, л	4	3	2
Пиросульфит натрия, кг	5	4	-
Бисульфит натрия, кг	6	5	-

Результаты исследований, проведенных на Нижегородской сельскохозяйственной опытной станции по использованию пиросульфита натрия, бензойной и муравьиной кислот показали, что корма, заготовленные с применением указанных консервантов, по питательным свойствам близки к зеленым растениям, при этом потери питательных веществ на 18...22 % меньше по сравнению с обычным силосованием.

Для улучшения качества силоса рекомендуется использовать *закваску молочно-кислых бактерий*. Потери углеводов и белка в силосе с закваской сокращаются на 5...10 %. Силос, полученный с закваской, лучше поедается животными, оказывает положительное влияние на их продуктивность.

Сенаж высокого качества содержит 11...15 % протеина, 40...65 мг/кг каротина, не более 25 % клетчатки. Питательность 1 килограмма такого сенажа составляет 0,40...0,45 КЕ, по вкусовым качествам он значительно превосходит силос. Лучшие культуры для его приготовления – многолетние травы: клевер, люцерна и их смеси со злаковыми травами.

В производственных условиях качественные показатели сенажа не всегда отвечают необходимым требованиям, и корм по питательности и качеству почти не отличается от обычного силоса, а иногда и уступает ему. В нем мало содержится сахаров и каротина, накапливается много кислот. Ос-

новная причина – нарушение технологических требований и особенностей, присущих этому способу консервирования.

При производстве *травяной муки* одна из важнейших проблем – сохранение каротина и протеина при сушке и в период последующего его хранения. Пересушивание муки до 5...6 % резко снижает содержание в ней каротина и биологически полноценного протеина. Оптимальная влажность травяной муки на выходе из сушильного агрегата должна составлять 10...12 %, при содержании влаги свыше 15 % мука плесневеет. В настоящее время находит все большее применение *гранулирование травяной муки*. Травяная мука и гранулы из нее хорошо поедаются животными.

Аналогично травяной муке заготавливается *травяная резка*, для рогатого скота и овец. Основное отличие от технологии приготовления травяной муки заключается в том, что сухая травяная масса из сушильного агрегата направляется не в дробилку, а непосредственно к постоянному месту хранения.

1.2 . КРАТКИЙ ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЙ ЗАГОТОВКИ ГРУБЫХ КОРМОВ

В разделе наряду с обзором технологий заготовки грубых кормов, рекомендуемых технической и справочной сельскохозяйственной литературой, приводятся апробированные практикой научные и практические разработки ведущих исследователей Нижегородской государственной сельскохозяйственной академии [1, 13, 14, 15, 16, 51].

Кошение травы

Высота среза травостоя на природных лугах и сеяных многолетних трав должна быть не более 5...6 см. Скашивание надо проводить в утренние часы, когда в травах максимальное содержание каротина.

Для скашивания используются ножевые и роторные косилки. На небольших участках (не более 10 га) неправильной конфигурации целесообразно скашивать траву однобрусной косилкой КС-2,1, которая агрегиру-

ется с тракторами класса 6 кН и 14 кН. На больших участках сеяных трав и естественных сенокосов используют двух-трехбрусные косилки типов КД-Ф-4,0 или КП-Ф-6,0.

На участках с высоким урожаем (150 ц и больше) зеленой массы, а также с полеглым и перепутанным травостоем применяют ротационные косилки КРН-2,1 и КПРН-3,0А. косилки КРН-2,1 и КПРН 3,0. Последняя одновременно со скашиванием плющит стебли трав. Ротационные косилки агрегируются с тракторами МТЗ всех модификаций.

Для уборки бобовых трав с плющением используют самоходные косилки КПС-5Г и Е-301. Плющение применяют прежде всего при уборке грубостебельных бобовых трав (люцерна, клевер и др.). В неустойчивую погоду проводить плющение не следует, т.к. в результате вымывания увеличиваются потери питательных веществ. Наилучшее качество работы ножевых косилок достигается при работе на скорости до 10 км/ч. Режущие аппараты косилок должны работать на всю ширину захвата. Для обеспечения чистого среза стеблей сегменты ножей должны быть острыми.

Качественная работа роторных косилок достигается при работе на больших площадях с ровным профилем при скорости движения агрегата свыше 10 км/ч. Трава после роторных косилок ложится более рыхло, что ускоряет процесс просушки.

Направление движения косилочного агрегата выбирают исходя из следующих правил: на лугах – по их длинной стороне; на полях сеяных трав – по направлению пахоты; на склонах – поперек склонов.

Провяливание травы

При заготовке сена по любой технологии скошенные растения должны как можно меньше времени находиться в поле для провяливания. В скошенных растениях происходят ферментативные процессы превращения веществ. Под их воздействием снижается содержание углеводов в сене. Установлена прямая зависимость между потерями питательных веществ и уровнем снижения влажности скошенных растений. При провяливании та-

ких скошенных злаковых трав до влажности 25...30 % теряется в пределах 20 % сухого вещества, а при провяливание бобовых – до 25 %.

Ускорить провяливание можно плющением и ворошением стеблей. Для ворошения травы в прокосах, сгребания в валки, оборачивания и разбрасывания валков применяют: грабли ГВК-6Г, которые агрегируются с тракторами МТЗ всех модификаций; грабли-ворошилки роторные модульные ВРМ-Ф-с; грабли-ворошилки ротационные ГВР-Б.

Сгребание скошенной травы граблями ГВК-6,0 можно проводить как одной, так и двумя секциями, а оборачивание валка – одной секцией. Валок массой 2,5...3,0 кг и шириной не более 1,4 м при урожайности травы 30 ц/га образуют одной секцией граблей ГВК-6,0, а при урожайности меньше 30 ц/га такой валок образуется двумя секциями этих граблей. Для нормальной работы на сгребании травы колеса граблей ГВК-6,0 устанавливают так, чтобы зубья находились на высоте 1,0...2,0 см от поверхности почвы.

Ворошение скошенных трав применяют для ускорения сушки, особенно на высокоурожайных участках, где трава при скашивании ложится неравномерным плотным слоем. При ворошении масса скошенной травы вспушивается, в результате чего улучшается ее естественная аэрация. Процесс сушка происходит более равномерно и интенсивно. Ворошение проводят одновременно или вслед за скашиванием. Провяливание в прокосах бобовых трав (люцерна, клевер и др.) заканчивают, как только влажность их листьев и стеблей достигает 55...60 %, у злаковых трав влажность должна составлять 40...45 %. После этого траву сгребают и досушивают до требуемой по технологии влажности (в зависимости от технологии приготовления сена) в валках.

Ротационные грабли-ворошилки обеспечивают качественное ворошение травы в прокосах и вспушивание валков, а также формирование рыхлых и равномерных валков при сгребании. Но производительность этих граблей невысока – 14...15 га за смену. Их применяют на участках с невы-

сокой урожайностью. Для ускоренного проявлявания и качественного формирования валка из высокоурожайных трав используют ротационные грабли-ворошилки с шириной захвата 4,5...5,0 м.

Заготовка рассыпного сена

Сено влажностью 18...20 % с помощью подборщика-копнителя собирают в копны. Для сволокивания копен применяют волокушки ВНШ-3,0 и копновоз КУН-10. Копны сена в транспорт загружаются фронтальным погрузчиком ПФ-0,5 или копновозом КУН-10 и транспортируются к местам складирования тракторными прицепами 2ПТС-4М-785А, 2ПТС-4-887А (с кузовом вместимостью 20 м³), ПСЕ-12,5 и автомобилями. Для формирования копен используют также стогообразователь СПТ-60, который агрегируется с трактором Т-150К. Процесс формирования стога заключается в следующем: сено из валков подбирают подборщиком барабанного типа и подают в ротор вентилятора. Центробежная сила, развиваемая ротором, выбрасывает сено через разгрузочную трубу в прессовальную камеру. Отражательный щиток, управляемый трактористом, позволяет равномерно распределить сено по всей камере. При наполнении прессовальной камеры агрегат останавливается и включается пресс. Для формирования стога массой 5...6 т достаточно 2...3 уплотнений. Стогообразователь СПТ-60 надежно работает при подборе сена из валков при влажности растительной массы не выше 18...20 %. Стога, сформированные СПТ-60, хорошо сохраняют форму и противостоят дождю.

Для перевозки стогов, сформированных СПТ-60, используют стоговоз СП-60, который агрегируется с трактором МТЗ-80. Конструкция стоговоза позволяет перевозить стога сена без применения ручного труда, производить быструю выгрузку стога с хорошим сохранением его формы.

Сено в скирды укладывают равномерно, середину скирды делают плотнее, и она должна возвышаться над краями. Правильная укладка сена имеет большое значение для его сохранности при хранении на площадках.

Заготовка прессованного сена

Один из прогрессивных способов заготовки сена – прессование его в тюки и рулоны. При применении этой технологии сокращаются механические потери корма в 2,0...2,5 раза, т.к. отпадает ряд операций (сволакивание, копнение), при которых происходит значительное осыпание листьев. Существенно снижаются затраты на перевозку тюкованного сена к местам хранения за счет более полного использования грузоподъемности транспортных средств, уменьшается потребность в хранилищах.

Принцип технологии заготовки прессованного сена заключается в следующем: скошенную и провяленную до влажности 30...35 % траву подбирают и прессуют в тюки или рулоны с помощью пресс-подборщиков, транспортируют к месту хранения, укладывают в штабель. Технологический процесс скашивания и провяливания трав на поле при заготовке прессованного сена проводится теми же машинами, что и при заготовке рассыпного сена. Чтобы не возникли очаги порчи прессованного сена (самосогревание и плесневение), провяленную траву прессуют в тюки при влажности 20...22 %, если не предусматривается досушивание сена активным вентилированием. Если планируют досушивание сена активным вентилированием, скошенную траву прессуют при влажности 30...35 %.

Необходимо не допускать даже незначительного пересушивания травы в прокосах, т.к. оно ведет к увеличению потерь наиболее ценной части растений – листьев.

Подбор травы из валков, образование тюков и рулонов осуществляют пресс-подборщиками ПСБ-1,6, ППВ-1,6, «Киргизстан» К-453, ПРП-1,6. Для обвязки тюков и рулонов используют синтетический шпагат. Все пресс-подборщики агрегируются с тракторами МТЗ всех модификаций.

Участки, на которых намечается провести прессование сена, должны быть чистыми от грубостебельчатых и других сорняков (мокрица, лебеда, осот и т.п.).

Пресс-подборщик ПС-1,6 формирует сено в тюки прямоугольной формы 360x500x1000 мм. Плотность регулируется от 120 до 200 кг/м³. Если заготавливается сено высокой степени плотности (150...200 кг/м³), то используют для обвязки проволоку, при меньшей плотности прессования – шпагат. В среднем на одну тонну прессованного сена расходуется 15 кг синтетического шпагата. В зависимости от влажности прессуемого сена и плотности прессования масса одного тюка составляет 20...25 кг.

При выбросе тюков пресс-подборщиками в поле подбирают тюки и формируют штабель прицепной тележкой – подборщиком-тюкоукладчиком ГУТ-2,5. Двигаясь по полю, машина подбирает тюки с помощью транспортеров и гидравлической системы, укладывает их в штаблеобразователь (9 рядов по 8 тюков в каждом). Штабель выгружают в поле или транспортируют к месту хранения. При больших расстояниях для перевозки тюков используют транспортировщик штабелей навесной ТНШ-2,5А. Для подбора тюков сена можно использовать подборщик тюков ПТН-4 или подборщик-метатель тюков МТ-1. Тюки сена перевозят к местам хранения и укладывают в штабели (размером 5,0...5,5x20 м и высотой 16...18 рядов тюков) на специально отведенную площадку.

Прессованное в тюки сено укладывают на подстожьях, которые устраиваются из соломы, старого сена или горбыля, чтобы предохранить нижние тюки от возможной порчи снизу. Первый ряд тюков ставят на ребро плотно друг к другу. Вторым и последующим рядами тюков – плашмя, подобно тому, как делают кирпичную кладку. В четных рядах по длине, а в нечетных по ширине штабеля оставляют воздухопроводящие каналы для естественной вентиляции шириной 25...30 см. На пересечении продольных и поперечных каналов образуют вертикальные каналы. К вершению штабеля приступают с 10-го ряда, в котором делают только продольные каналы, а тюки укладывают, отступая на 1/3 длины тюка от краев штабеля предыдущего ряда. Аналогично укладывают все последующие ряды. В результате получается вершина правильной двухскатной или четырехскат-

ной формы. Сверху штабель укрывают соломой.

Если предполагают досушивать прессованное сено активным вентилированием, то тюки формируют укороченными, размером 40x36x52 см, массой 12...14 кг при плотности прессования 130 кг/м³. Заготовка прессованного сена в короткомерных тюках также в значительной мере способствует облегчению труда при погрузке и выгрузке, а в дальнейшем – раздаче его животным.

Короткомерные тюки загружают на вентиляционные площадки навалом, что упрощает и облегчает процесс загрузки сена в хранилище, а также создает благоприятные условия для равномерной сушки тюков. Тюки загружают на вентиляционную установку так, чтобы они распределялись по решетчатому настилу и за его пределами не более, чем на 1 м, а в сторону решетчатого настила смежной установки – на 0,5 м.

Подбор травы из валков и образование рулонов производят пресс-подборщиком рулонным ПРП-1,6, который прессует сено и рулоны цилиндрической формы диаметром до 1,5 м и длиной 1,4 м при плотности прессования от 120 до 200 кг/м³. Средняя масса рулона сена 350...500 кг. Расход шпагата на тонну сена – не более 0,5 кг. По мере продвижения вдоль вала пресс-подборщик пружинными пальцами подхватывает сено и направляет его на ленты транспортера, где с помощью валика и барабана оно направляется в камеру формирования рулона. По мере поступления сена в прессовальную камеру диаметр и плотность рулона возрастает до заданных размеров.

Необходимо хранить рулоны в сенных сараях или под навесами. При хранении рулонов на открытых площадках для предотвращения порчи нижних рулонов при соприкосновении с землей под основания штабеля укладывают соломой слоем 30...40 см. При использовании погрузчика КУН-10 на укладке рулонов в скирды в основании штабеля по торцу укладывают три рулона, затем на них два и сверху один. В этом случае получается штабель шириной 4,5 и высотой 4 м. При такой укладке и длине шта-

беля в 10 рулонов общая масса сена составляет около 30 т. При использовании на укладке стогометателя ПФ-0,5 в основание укладываются четыре рулона, затем три, два и один. При длине в 10 рулонов, высоте скирды 5,5 м, ширине 6 м общая масса получается – до 50 т. После укладки штабеля верх его также закрывают соломой. Прессованное в рулоны сено перед скармливанием животным измельчают с помощью дробилки-измельчителя кормов ИРТ-165.

Внедрение рулонной технологии в Опытном производственном хозяйстве «Центральное» Нижегородской сельскохозяйственной станции показало, что такой комплекс машин позволяет полностью механизировать заготовку сена, упростить и удешевить транспортировку, исключить ручной труд на всех операциях.

Заготовка измельченного сена

При заготовке измельченного сена траву в поле провяливают до влажности 40...45 %, т.к. при более низкой влажности при подборе и измельчении резко возрастают механические потери.

Принцип данной технологии заключается в следующем: подвяленную траву одновременно подбирают, измельчают и грузят в транспортные средства силосоуборочными комбайнами, транспортируют и закладывают на хранение в сенные сараи и башни. Оптимальный размер измельчения растений составляет 8...15 см.

С поля измельченную массу доставляют к месту хранения прицепами ПСЕ-12,5, ПИМ-40 и другими транспортными средствами с сетчатыми ограждениями. Пневматическим транспортером ТЗБ-30 загружают сено в хранилище, а при отсутствии используют пневматический эжекторный транспортер ТПЭ-10А.

Измельченную траву досушивают активным вентилированием в хранилищах сарайного и башенного типов. Сено в сараях досушивают на установках с решетчатыми каналами и настилами. Перед загрузкой измельченного сена укладывают рассыпное сено слоем 5...10 см для предохра-

ния от засорения воздухораспределительных каналов. Провяленную массу на досушку укладывают влажностью до 45 %. Толщина слоя, укладываемого за один прием, не должна превышать 2 м. Последующие слои добавляют после того, как влажность сена в верхней части достигнет 25 %. Общую высоту измельченного сена на вентиляционной установке с решетчатым настилом делают до 6 м.

При досушивании сена в башенных хранилищах происходит следующее: вначале в башню загружают сено более низкой влажности (до 35 %) высотой до 1,5 м (для облегчения вентилирования нижнего слоя); потом загружают слой 5...6 м более высокой влажностью и вентилируют 4...5 дней, а затем закладывают последующие слои и продолжают вентилирование всей массы в башне. Первые двое суток сено сушат непрерывно, а в дальнейшем – только днем. В дождливую погоду вентилирование прекращают. Окончание сушки определяют по температуре, которая при длительно включенном вентиляторе не должна повышаться. Для этого в башне устанавливают несколько дистанционных термометров для определения температуры внутри слоя.

Существует еще один способ заготовки измельченного сена с влажностью 20...25 % и хранения его в заглубленных траншеях, укрытых пленкой. По данной технологии траву скашивают косилкой КПВ-3,0А, которая одновременно формирует валки, или обыкновенной косилкой с последующим сгребанием сена в валки граблями-ворошилками. Для подбора высушенной массы используют кормоуборочный комбайн КСК-100, укомплектованный, кроме силосопровода боковой выгрузки, силосопроводом задней выгрузки с прицепным устройством (Е-281С или КСС-2,6А). Сбор измельченной массы осуществляют в специальные прицепные емкости ПСЕ-Ф-12,5 или ПСЕ-Ф-20. Длину резки устанавливают максимально возможной. Каждому комбайну придают трактор МТЗ-80 с двумя прицепами ПСЕ-Ф-12,5, которыми осуществляется доставка массы к месту хранения.

Место для закладки сена на хранение выбирают на склонах, для избе-

жания затекания паводковых и дождевых вод. Оптимальная ширина траншеи по дну составляет около 7 м, по верху – 14...15 м. Для разравнивания массы в траншее и ее трамбовки используют бульдозер или тракторы Т-150К, Т-151К. В одном кубометре объема может быть заложено в зависимости от трамбовки 150...200 кг сена.

Очень важно правильно сформировать верх бурта при трамбовке. Он должен иметь равномерную плотность укладки и в поперечном разрезе округлую форму, во избежание западин, образующихся при осадке, накопления в них воды и порчи корма. Под пленку кладут слой хорошо утрамбованной зеленой массы толщиной 25...50 см. Пленку сваривают и укрывают слоем земли с помощью буртоукрывателя БН-10А. Иногда укрывают ею бурт внахлест. При отсутствии пленки сено укрывают слоем зеленой резки, полученной от подкоса пастбищ, или другого малоценного, имеющегося под рукой, корма.

В приложении приводится перечень рекомендуемых машин и оборудования для заготовки грубых кормов в зависимости от ботанического состава и урожайности естественного или сеянного травостоя.

1.3. СОКРАЩЕНИЕ ПОТЕРЬ ПРИ УБОРКЕ И ХРАНЕНИИ КОРМОВ

Различают два вида потерь – количественные (недобор по массе) и качественные (полное или частичное снижение кормовых свойств). Недобор по массе биологического урожая связан с механическими потерями при скашивании, подборе, измельчении, погрузке и транспортировке массы, а также с разложением органических веществ и снижением поедаемости. Качественные потери вызваны несоблюдением сроков уборки трав, нарушением технологии сушки и хранения.

Неизбежный недобор питательных веществ даже при оптимальной технологии заготовки грубых кормов из трав составляет 5...8 %. Реальные потери при заготовке рассыпного сена естественной сушки в поле значи-

тельно колеблются и достигают 40...50 % и более, каротина – до 90...95 % [17, 31, 47, 54]. Потери подразделяются на следующие составляющие (средние значения): в результате дыхания растений кормовая ценность сена снижается на 5...15 %; от механических повреждений – на 10...15 %; от вымывания может теряться до 10 %; от самосогревания, повторного брожения и ферментации в стоге – до 10...15 %; от снижения кормовой ценности при сушке – до 10 %. При заготовке сена в естественных условиях в среднем теряется до 5 % сухого вещества за день пребывания в поле при благоприятной погоде и до 15 % – в плохую погоду. Перевариваемость сена, заготовленного естественной сушкой, близка к 50...60 %.

Основным условием получения высококачественного сена является сокращение времени пребывания скошенной травы в поле. Для этого необходимо уменьшить до минимума продолжительность периода сушки, что возможно только в результате применения искусственного обезвоживания зеленой массы.

Искусственная сушка осуществляется путем продувки подогретого или не подогретого атмосферного воздуха через слой скошенной травы (способ активного вентилирования) или тепловой обработки травы во взвешенном состоянии в специальных сушильных установках различных конструкций (тепловая сушка).

В климатических условиях нечерноземной зоны России при массовой заготовке грубых кормов активная вентиляция даже при неблагоприятных погодных условиях дает надежную гарантию минимизации потерь питательных веществ и получения высококачественной продукции.

Продолжительность сохранности свежескошенной травы ограничивается сроком появления плесени и зависит от температуры воздуха в массе травы. Максимальная продолжительность периода до появления плесени приведена в табл. 1.3. На рис. 1.1 показана зависимость срока устойчивой сохранности провяленной травы различной влажности от температуры воздуха. Для предотвращения плесневения досушка активной вентиляцией

Сроки сохранности свежескошенной травы

Температура травы, °С	Максимальные сроки хранения, ч, в зависимости от относительной влажности воздуха φ_B	
	$\varphi_B = 90 \%$	$\varphi_B = 95 \%$
15	145	160
18	60	90
24	40	65
30	35	60
40	33	58

должна быть проведена максимально быстро, не более чем за пять-шесть дней (60...80 ч работы систем активной вентиляции).

Плющение грубостебельчатых бобовых трав (люцерны, клевера и др.) во время скашивания приводит к увеличению поверхности стеблей, повышению интенсивности процесса испарения, благодаря чему сено высыхает более равномерно.

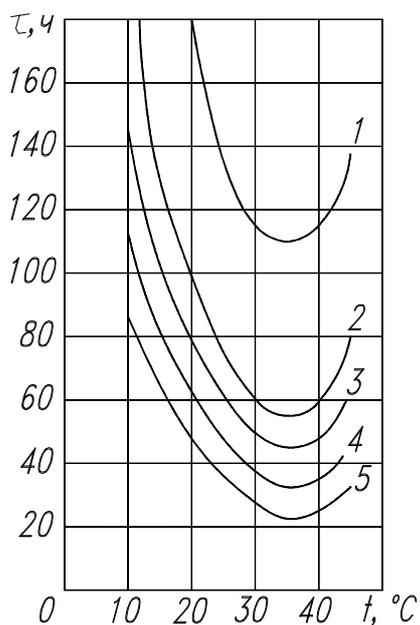


Рис. 1.1. Сроки устойчивой сохранности провяленной травы: 1 – влажность травы 20 %; 2 – 35 %; 3 – 45 %; 4 – 55%; 5 – 65%

Этот прием в 1,5...2,0 раза ускоряет сушку и на столько же снижает потери сухих веществ, в 3...5 раз снижает потери сырого протеина, в 2...4 раза – потери каротина по сравнению с полевой сушкой без плющения.

Активное вентилирование широко применяется при досушивании прессованного в тюки и рулоны сена. Чтобы не возникли очаги порчи (самосогревание и плесневение), провяленную траву прессуют в тюки при влажности 20...22 %, если не предусматривается досушка активным вентилированием.

Если планируется применение активной вентиляции, то траву прессуют при влажности 30...35 %.

Прессование снижает механические потери при перевозке и раздаче кормов в комплексах.

Рассыпное сено в скирдах под открытым небом теряет сухих веществ примерно в четыре раза больше, чем прессованное сено в таких же условиях, а если то и другое хранятся в сараях или под навесами, то разница становится семикратной.

Уложенное на хранение сено не остается неизменным.

Влажность корма в период хранения колеблется и в отдельных местах скирд может превысить уровень, при котором исключается микробиологическая деятельность. По имеющимся литературным данным потери сухого вещества от биохимических реакций и микробиологической порчи при хранении сена в течение года в благоприятных условиях лежат в пределах 2...3 %. Вместе с тем продолжаются и процессы ферментизации, во многих случаях улучшающие вкус корма.

Хранение рассыпного сена в поле без укрытия сопровождается потерями сухих веществ до 40 %, укрытие скирды пленкой снижает их до 30 %, а укладка под навес или в сенохранилище – до 5 %. Прессованное сено под навесом имеет сохранность до 99 %.

При хранении сена под открытым небом происходит порча наружного слоя скирды: непригоден для скармливания скота слой сена на вершине до 0,5...0,7 м, с боков – до 0,15 м и у основания – до 0,5 м. Если устанавливается продолжительная дождливая погода, на открытых площадках следует применять пленочное покрытие скирд и штабелей (см. раздел 2.2.1). Штабели из тюков и рулонов рекомендуется сверху укрывать соломой.

Хранение соломы в полевых условиях в скирдах приводит к потерям ее питательности до 15 %.

Потери сена и соломы тем больше, чем меньше размер скирд и стогов (подвергающаяся атмосферным воздействиям поверхность двух скирд по 10 т примерно в 1,5 раза больше, чем одной скирды массой 20 т).

1.4. БИОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ТРАВЫ

Растительная клетка может быть представлена наполненным клеточным соком двухслойным мешочком, наружной стороной которого является целлюлозная оболочка, а внутренней – выстилающий слой полужидкой протоплазмы. Этот слой по своим свойствам приближается к полупроницаемым перепонкам. Он легко пропускает из клетки воду, но задерживает растворенные в клеточном соке вещества.

Испарение воды с поверхности клеток происходит в межклеточники, которые представляют собой систему проветривания, сообщающуюся с атмосферой через устьицы (устичная транспирация). Площадь поверхности межклеточных воздушных пространств относится к наружной поверхности растений с тонкими листьями как (7...10):1, с толстыми световыми листьями – как (17...30):1.

Площадь устьиц составляет не более 1...2 % поверхности листа при числе 50...500 и даже до 1000 на 1 мм². Завядание, потеря упругости (тургора) тканями растений влечет за собой полное закрытие устьиц. Такое явление наблюдается вскоре после скашивания травы. Поэтому устичная транспирация не является основным путем удаления влаги из растений при их сушке. Профессор В.А. Бориневич в предисловии к русскому изданию монографии С.Дж. Уотсона и М.Дж. Нэша [47] подтверждает это положение: «У срезанных растений устьицы закрываются, причем у злаковых трав обычно бывают закрытыми все устьицы, а у бобовых большинство; следовательно, при укладке свежескошенных растений в валки устичная транспирация также не может играть какой-либо значительной роли как в общем испарении влаги, так и в вытягивании влаги из стеблей. Это положение подтверждается в опытах автором...при сушке целых растений люцерны и с отдельными листьями».

Процесс выделения влаги через отдельные устьицы может быть представлен в виде двух фаз: испарение с поверхности клеток в межклеточни-

ки; диффузия пара к устьицам и дальнейшее удаление его от поверхности травы. Воздух в межклеточниках при этом полностью или практически полностью насыщен водяными парами.

Одновременно происходит более медленный процесс испарения влаги с поверхности клеток эпидермиса из-за наличия влагопроводности между клетками. По определению профессора Н.А. Максимова [30], растительная клетка представляет собой осмометр. В завядающих растениях осмотическое давление (сосущая сила клеточного сока) повышается и при полном завядании достигает максимума. Снижение скорости испарения по мере уменьшения биологической активности названо витальным сопротивлением к сушке. При отмирании клетки начинается коагуляция коллоидов, ведущая к разрушению покрывающей поверхности. Находящиеся в клетке вещества вступают в беспорядочное взаимодействие друг с другом, перестают удерживаться клеткой и свободно выходят из нее в окружающую среду (начинается процесс гниения).

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

Из-за сложной структуры органических веществ травы природу отдельных сил связи влаги в ней (химическая, физико-химическая, физико-механическая) точно установить не представляется возможным [38]. Химическая связь влаги в соединениях и кристаллогидратах (молекулы воды входят в состав веществ) влияет на химическую природу вещества и нарушается с большим трудом. Удаление такой влаги не может считаться сушкой в собственном смысле слова. Физико-химическая связь влаги с материалом менее прочна. Она возникает за счет адсорбции и осмотических сил, а также из-за удержания воды в структуре гелей. Полностью удалить такую воду трудно. Под физико-механически связанной влагой понимается вода в порах, пустотах и жидкость смачивания. Она испаряется относитель-

льно свободно.

Для травы суммарное проявление всех видов связи влаги при условии термодинамического равновесия описывают изотермами сорбции-десорбции по типу приведенных на рис. 1.2. Воду в растительных продуктах условно делят на свободную и связанную. Говоря о последней, имеют в виду химически (и часть физико-химически) связанную воду, удерживаемую наиболее прочно. Менее прочно удерживаемую физико-химически связанную влагу и воду, связанную механически, относят к свободной [31]. Основная часть воды находится в траве в свободной форме, и лишь 5...15 % – в связанном состоянии.

При начальной влажности свежескошенных трав $\omega_{\text{тр}} = 75...80$ % их влагосодержание $u_{\text{тр}}$ составляет 3...4 кг/кг сух. в-в. Начиная с $\omega_{\text{тр}} = 35$ % в сохнувшей траве остается только термодинамически связанная влага, на которую приходится от 12,5 до 17 % ее общего количества. Влажность злаковых трав во всех фазах развития обычно меньше, чем бобовых. Со старением трав влажность их уменьшается.

Энергетическая основа жизни растительного организма заключается в дыхании. Аэробная реакция дыхания [3, 30, 48]:



или в грамм-молях:

$$180 + 192 = 264 + 108.$$

В формуле (1.1) $\Delta G^{\circ} = -2874$ кДж – стандартное изменение свободной энергии, представляющее собой изменение свободной энергии системы ΔG , которая может быть использована для выполнения работы при постоянном давлении и температуре.

Необратимый ход деструкции приводит к потере первоначальной высокой организованности продукта с выделением углекислого газа (CO_2), воды и теплоты. Из уравнения дыхания (1.1) можно получить: при полном разложении 1 кг органических веществ выделяется 15 960 кДж теплоты и 600 г воды, а выделению 1 мг CO_2 соответствует 12,5 кДж теплоты.

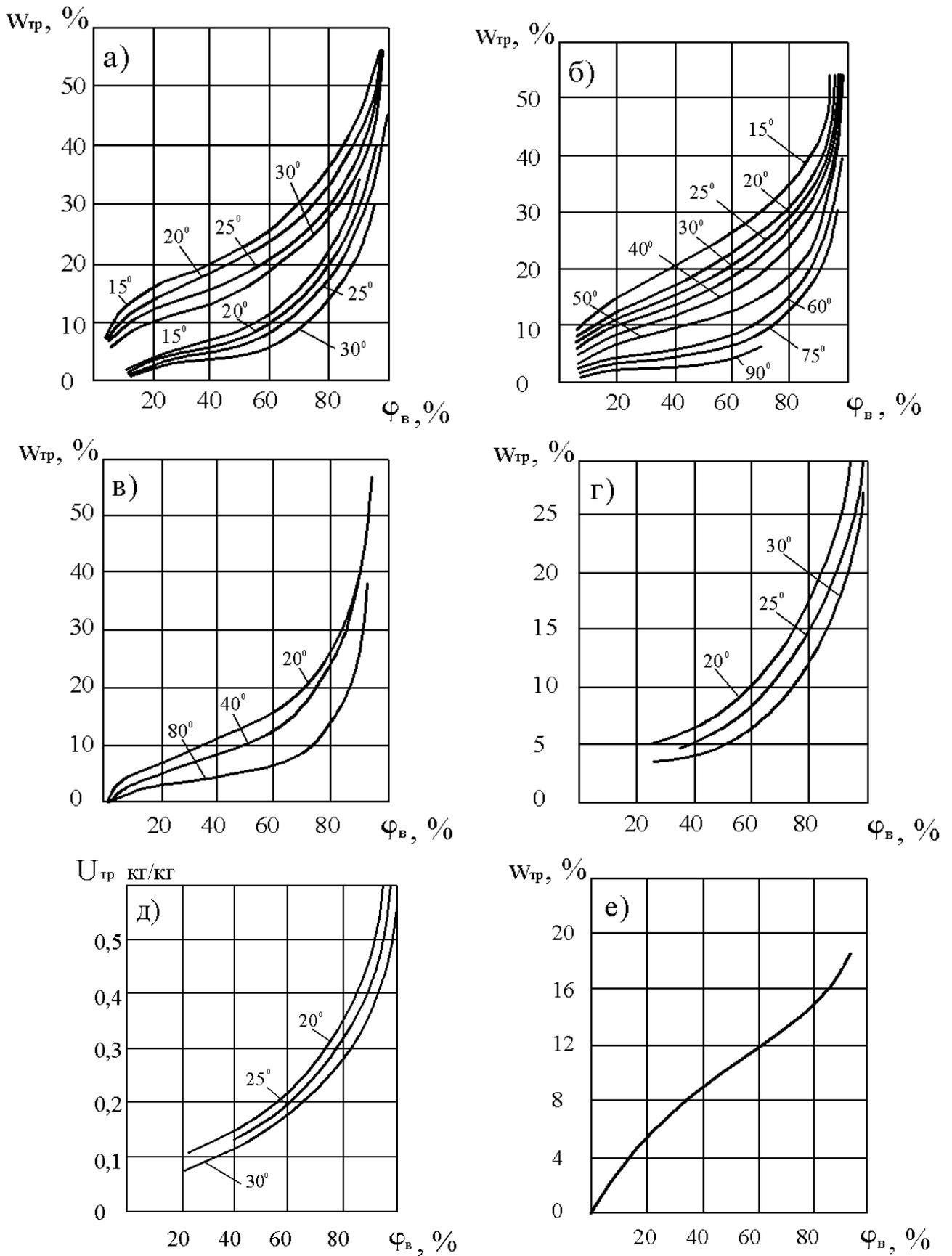


Рис. 1.2. Изотермы: а – сорбции и десорбции влаги для тимофеевки; б – десорбции сена (луговая трава) [64]; в – десорбции сена (луговая трава) [61]; г – сорбции (люцерна) [42]; д – сорбции (луговая трава) [67]; е – сорбции (прессованная солома) [26]

Изменения интенсивности дыхания травы q_v , Вт/т, и выделения CO_2 g_v , г CO_2 /(т.ч), при колебаниях температуры продукции находятся по формулам [50]:

$$q_v = q_0 \exp(kt); \quad g_v = g_0 \exp(kt). \quad (1.2)$$

В срезанной траве некоторое время продолжается физиологическая жизнь, сопровождающаяся аэробным дыханием. Отмирание клеток начинается, когда удалена основная масса свободной воды при $\omega_{\text{тр}} \leq 35 \dots 40 \%$ [47], а развитие микроорганизмов и плесневых грибков полностью прекращается при влажности $\omega_c \cong 15 \%$. Поэтому кондиционная влажность сена считается $\omega_c = \omega_k = 15 \dots 18 \%$ [4, 11, 40]. На рис. 1.3 показан уровень, до которого поднимается температура в недостаточно высушенном сене [34]. Первый пик вызван дыханием клеток, второй – дыханием быстро развивающихся грибков.

Количество явной теплоты, выделяемой травой q_v , Вт/т, ориентировочно определяемое по зависимости (1.2), приведено на рис. 1.4. Там же показаны тепловыделения при $t = 22,5 \text{ }^\circ\text{C}$ [29]. Наличие испарительного эффекта усложняет экспериментальное нахождение величины явной теплоты дыхания травы и является одной из причин многообразия приводимых в технической и специальной литературе значений q_v : за весь период сушки 3 610...5 280 кДж/фунт [69]; сено сухое выделяет 6 970 [58], 10 350 кДж/(т.ч) [66].

Известно, что в массе недосушенного сена может произойти самовозгорание. С.Дж. Уотсон и М.Дж. Нэш [47] приводят следующую цитату из Плиния (1 столетие н.э.), говорящую о давней 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 абсолютно сухой. Если это предписание не выполняется точно, то утром из стога будет виден своего рода пар, и вскоре, когда станет горячим, то часто воспламеняется и таким образом погибает».

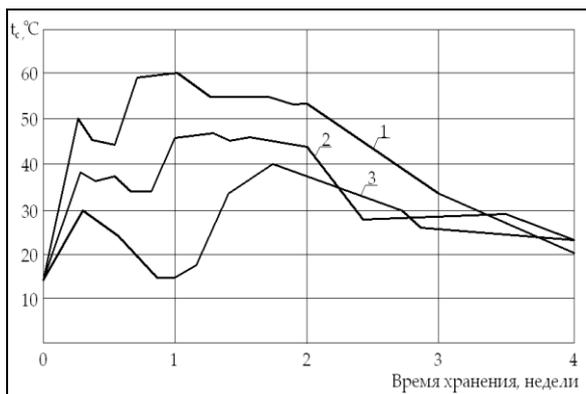


Рис. 1.3. Влияние дыхания и грибокв на температуру злакового сена в первый месяц хранения: 1 – $w_c=43\%$; 2 – $w_c=36\%$; 3 – $w_c=27\%$

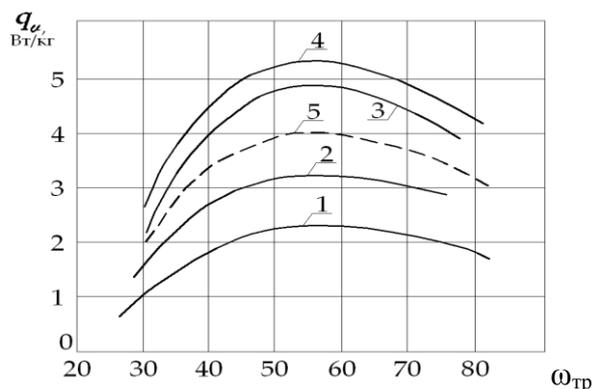


Рис.1.4. Удельные тепловыделения травы: 1, 2, 3, 4 – соответственно при $t = 14,7; 21,0; 25,2; 29,0\text{ }^\circ\text{C}$; 5 – средние значения при $t = 22,5\text{ }^\circ\text{C}$

Первая, чисто 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 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 возникнет воспламенение продуктов сухой перегонки и обугленной клетчатки.

1.5. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАВЫ И СЕНА

Изучение и учет физико-механических характеристик грубых кормов необходимы для более полного выявления особенностей тепло- и массообменных процессов в слое сохнувшей травы при создании, поддержании и регулировании технологических параметров микроклимата в период сушки, а также при хранении сена. На питательные свойства продукции рассматриваемые характеристики не оказывают практического значения.

Длина стеблей однолетних и многолетних злаковых и бобовых трав колеблется в широком диапазоне от 0,3 до 2,0 м. Стебли злаковых (а также части бобовых) трав имеют полую соломинку, у большинства бобовых стебли полностью или частично заполнены рыхлой ватообразной массой. Внутренняя полость стеблей в местах крепления листьев разделена перегородками. Приводятся следующие показатели для трав [17]: толщина листьев – 0,1...0,2 мм; удельная поверхность – 550...650 см²/г сух. в-ва; средний диаметр стеблей – 2...7 мм с удельной поверхностью 50...60 см²/г; плотность одной частицы травы для всех видов грубых кормов практически постоянна и в среднем для расчетов принимается $\rho_{\text{част}} = 1\ 500$ кг/м³ сух. вещ. Объемная плотность отдельных травинок (с учетом внутренних полостей, трещин) составляет $\rho_{\text{об}} = 280$ кг/м³ [37].

Содержание листьев и стеблей в свежескошенном клевере составляет соответственно 36 % и 64 % от общей массы, такое же соотношение сохраняется в сене после активного вентилирования. В сене, приготовленном в полевых условиях в благоприятную погоду, соотношение листьев и стеблей составляет 29 % и 71 %.

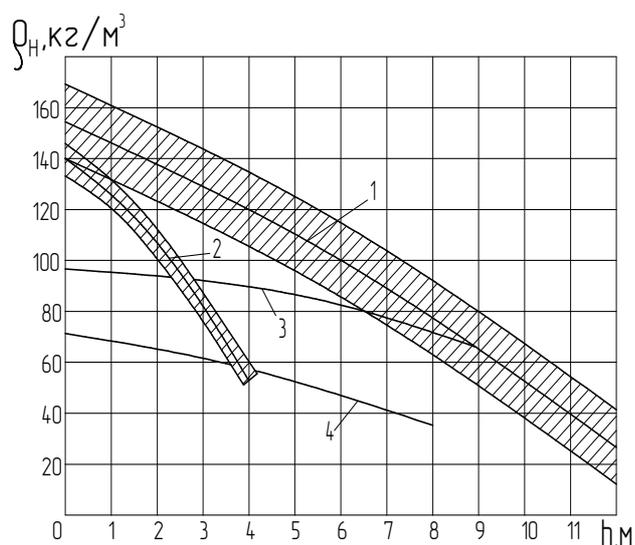


Рис. 1.5. Зависимость $\rho_n = f(h)$: 1 – красный клевер непосредственно после погрузки ($w_{\text{тр}} = 35...40$ %); 2 – то же после 9 месяцев хранения [65]; 3 – измельченная солома $w_{\text{тр}} = 19,5$ %; 4 – то же, $w_{\text{тр}} = 7,6$ % (по данным Кукте)

Обобщенные данные по изменению значений насыпной плотности рассыпного сена приведены в табл. 1.4. На рис. 1.5 дана зависимость насыпной плотности ρ_n от высоты слоя для сена из красного клевера. Плотность соломы в скирде $\rho_n = 40...65$ кг/м³ [25]. Объемная масса рулонного и прессованного сена достигает 150 кг/м³ [4, 25, 57] При плотности прессования ниже значений насы-

пной плотности обычного сена тюки и рулоны самоуплотняются, достигая величин, характерных для рассыпного сена.

Т а б л и ц а 1.4

Насыпная плотность рассыпного сена ρ_n , кг/м³

Вид сена	Продолжительность хранения в скирде			
	3...5 дней	1 мес.	5 мес.	6 мес.
Крупнотравное, тростниковое	37...42	45...51	50...55	51...61
Злаковое, злаково-разнотравное сеяное злаковое	40...50	44...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

Угол естественного откоса для травяной резки и измельченной соломы равен 55...70°. У рассыпного сена угол естественного откоса может достигать и даже превышать 90°. Коэффициент бокового давления (отношение бокового удельного давления к вертикальному) для измельченной травы равен 0,12...0,20.

Рассыпное сено в хранилищах укладывается высотой до 12...15 м. Математическим моделированием установлено [37], что оптимальным поперечным сечением скирды с точки зрения равномерного воздухораспределения при активном вентилировании является высота по гребню 6,3...6,5 м, ширина у основания 5,4...6,4 м при длине скирды 20 м. Считается оптимальной масса штабеля тюков 40...60 т при ширине штабеля 4...6 м и высоте 3,5...4,5 м.

Зависимость внешней пористости насыпи сена Π от насыпной плотности ρ_n аппроксимируется выражением: $\Pi = 99,0 - 0,353\rho_n$.

Потери давления в слое травы при одномерной фильтрации воздуха составляют [31, 37]:

$$\Delta p_o = k\rho_n^m u_{\phi}^n. \quad (1.3)$$

Сопротивление проходу воздуха при продувке параллельно направлению естественного уплотнения больше, чем в направлении, перпендикулярном уплотнению. В формуле (1.3) при продувке параллельно направле-

нию естественного уплотнения $k_{\parallel} = 0,092$, перпендикулярно уплотнению – $k_{\perp} = 0,054$; сильно облиственное сено имеет $m = 2,74$, $n = 1,54$; слабо облиственное – $m = 2,40$, $n = 1,60$; солома – $m = 1,20$, $n = 1,60$ независимо от направления продувки; u_{ϕ} – фильтрационная (набегающая на слой травы) скорость воздуха, м/с (рис. 1.6). Влажность сена оказывает незначительное влияние на аэродинамическое сопротивление.

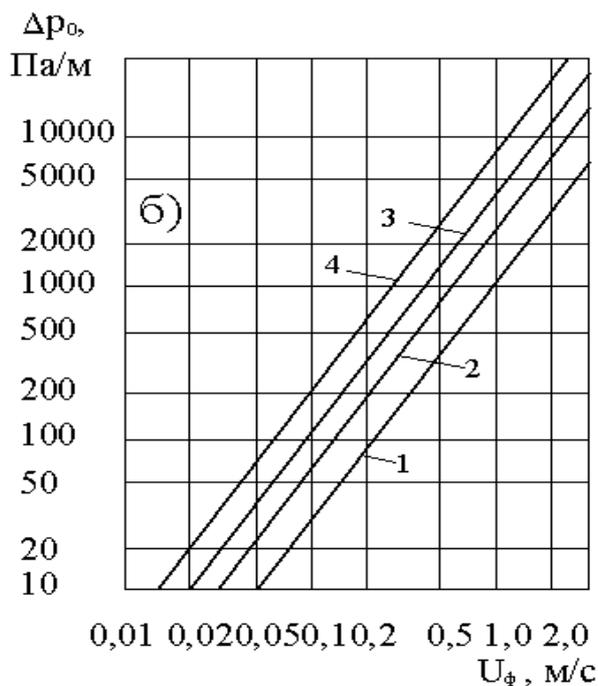


Рис. 1.6. Зависимость $\Delta p_0 = f(u_{\phi})$ для рассыпного сена в направлениях естественного уплотнения: 1 – $\rho_n = 50$; 2 – $\rho_n = 70$; 3 – $\rho_n = 90$; 4 – $\rho_n = 110$ кг/м³

В сенохранилищах одномерность потоков воздуха в слое продувки достигается, когда площадь живого сечения воздухораспределителей не менее 50 % площади пола [21, 29, 56].

Аэродинамическое сопротивление сена второго укоса обычно бывает выше, чем первого из-за большей облиственности травы.

В процессе сушки частицы травы усыхают, но одновременно происходит усадка слоя сена, в результате чего пористость и потери давления в процессе сушки в первом приближении можно считать постоянными.

Аэродинамическое сопротивление тюка прессованного сена Δp_0 минимально, когда воздух пронизывает его в направлении, перпендикулярном направлению прессования (рис. 1.7) [60].

Для штабеля прессованного сена расчетным путем показано, что при $\Delta p_0 = 50$ кг/м³ сквозь тюки проходит 95 % воздуха, при $\Delta p_0 = 100$ кг/м³ – 77% и при $\Delta p_0 = 150$ кг/м³ – 43 % [37].

Значения теплофизических показателей травы в пределах практичес-

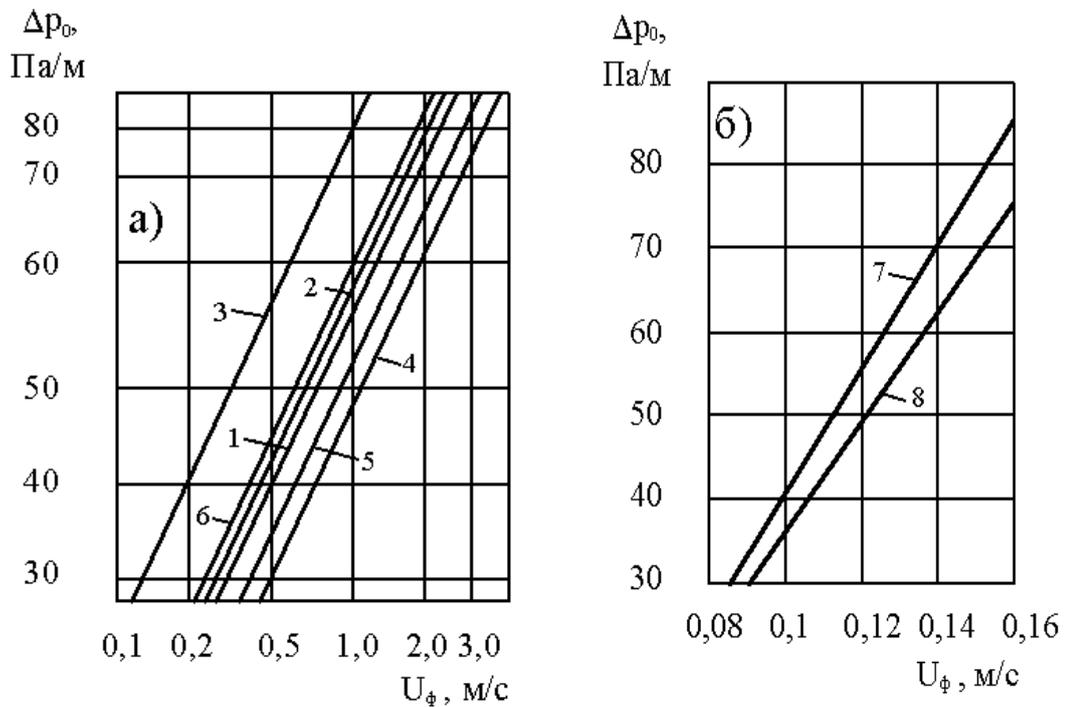


Рис. 1.7. Зависимость $\Delta p_0 = f(u_\phi)$ в тюке *а* и штабеле *б* прессованного сена: 1, 2, 3 – соответственно при $\rho_H = 55, 70, 124 \text{ кг/м}^3$ в направлении прессования; 4, 5, 6 – то же в перпендикулярном направлении; 7 – $w_{\text{тр}} = 34 \%$; 8 – $w_c = 14,6 \%$

кой точности коррелируются с содержанием сухих веществ $n_{\text{с.в.}}$, % [17].

Удельная теплоемкость сухих веществ травы $c_{\text{с.в}}$ принимается 1,2 кДж/(кг $^\circ$ С). На значения коэффициентов теплопроводности $\lambda_{\text{тр}}$, температуропроводности $a_{\text{тр}}$ и значения массовой теплоемкости $c_{\text{тр}}$ оказывают влияние ботаническая часть растения и влажность травы (рис. 1.8).

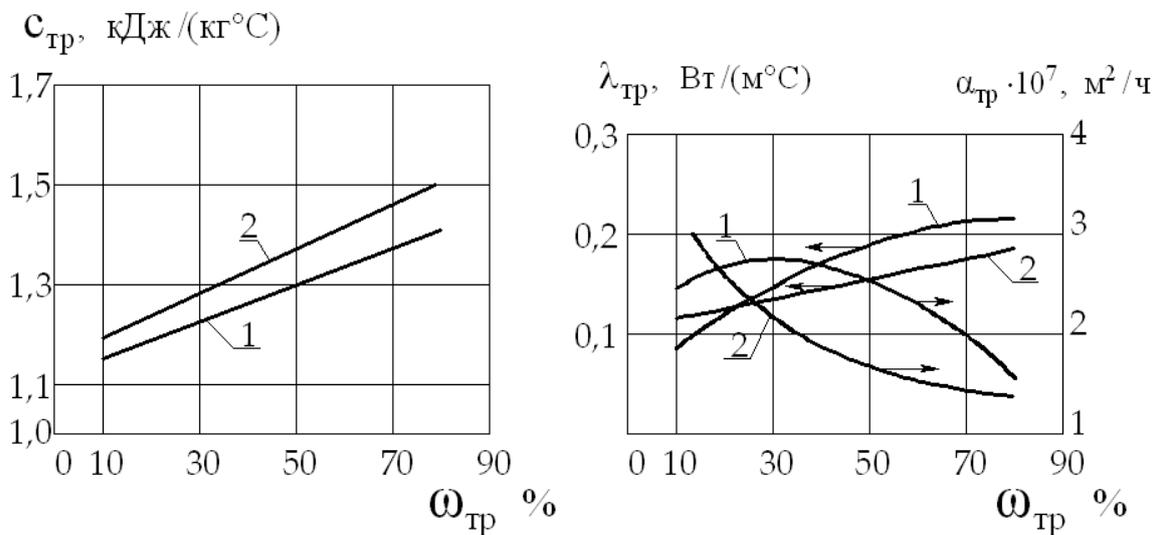


Рис. 1.8. Теплофизические характеристики травы: 1 – листья; 2 – стебли

В области влажного состояния травы при $t = 20...30$ °С до значений влажности $\omega_{\text{тр}} = 32...41$ % углубление зоны испарения не наблюдается, воздух в межклеточниках полностью насыщен, т.е. сушка идет с постоянной скоростью без витального сопротивления. Этот фактор особенно важно учитывать при низкотемпературной сушке неподогретым воздухом.

Энергия, затрачиваемая на удаление 1 киломоля воды из влажного материала, определяется по формуле [17, 19, 30]:

$$A = -RT \ln \varphi. \quad (1.4)$$

Когда $\varphi = 1,0$, то $A = 0$ ($A = RT \ln 1 = 0$).

Глава 2. Современные технологии сушки травы

2.1. ОБЗОР МЕТОДОВ РАСЧЕТА ВЛАГООТДАЧИ СОХНУЩЕЙ ТРАВОЙ

Неизбежные минимальные потери питательных веществ в результате дыхания скошенной травы в процессе сушки составляют 5...10 % [31, 34, 41, 44]. Однако ни одна из технологий заготовок кормов этим требованиям не отвечает. Сушка травы в естественных условиях зависит от множества случайных погодных факторов, практически неуправляема и даже при строгом соблюдении технологии уборки не может обеспечить качественного состава корма.

Так как единичные растения злаковых сохнут в 2...3 раза быстрее бобовых [47], ускорение в 1,5...2,0 раза естественной сушки последних достигается плющением [2, 35] (злаковые травы практически не отзываются на эту операцию [23]).

Максимальный срок заготовки сена ограничивается появлением плесени, но даже при благоприятных условиях сено должно быть заготовлено за 5...7 дней [29, 31, 47, 53, 60]. На рис. 2.1 и в табл. 1.3 показаны зависимости времени сохранения травы от температуры воздуха. Сроки устойчивой сохранности провяленной травы различной влажности от температуры воздуха приведены выше на рис. 1.1. Рекомендуется заканчивать сушку за 7...10 суток.

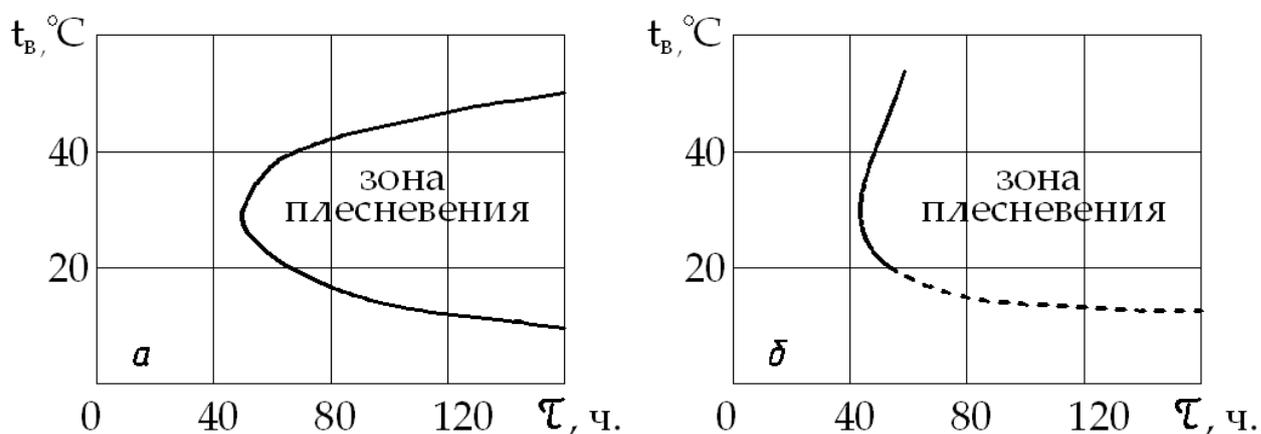


Рис. 2.1. Продолжительность сохранности влажной травы:
а – по Terry; б – по Lehmann

Продолжительность сушки соломы не должна превышать срока появления плесневых грибков в примесях травы [21].

Эффективными приемами, обеспечивающими качественную и быструю сушку в естественных условиях, является ворошение травы в прокосах и оборачивание валка. Ворошение непосредственно после скашивания может сократить общее время сушки на 30 %. Второе ворошение в хорошую погоду проводится через два-три часа после первого. Оборачивание валка более целесообразно для бобово-злаковых предварительно плющенных трав. В табл. 2.1 приведены данные по влиянию плющения, ворошения и переворачивания валка на продолжительность сушки травы.

Т а б л и ц а 2.1

Продолжительность сушки трав в естественных условиях в часах [4]

Способ сушки	Неплющенный прокос	Плющенный прокос	Неплющенный валок	Плющенный прокос и валок
Провяливание до влажности 45 %				
Без ворошения	56	33	43	42
Однократное ворошение	49	44	-	-
Двукратное ворошение или оборачивание валка	52	44	47	33
Сушка до влажности 20...22 %				
Без ворошения	99	70	76	73
Однократное ворошение	86	76	-	-
Двукратное ворошение или оборачивание валка	91	76	82	69

При благоприятных погодных условиях бобово-злаковые травы с урожайностью 45 ц/га сохнут в покосе с последующим сгребанием в валок около двух суток, а при урожайности 70 ц/га – в течение трех суток.

Скорость сушки травы в валках в среднем на 20 % меньше, чем в прокосах. В валках трава провяливается до 25 %, после чего она собирается в копны. Копнение задерживает сушку. Сено в копнах должно храниться не более одного-двух дней, иначе увеличиваются потери питательных веществ в результате воздействия внешних факторов (солнце, осадки и т.п.).

Темп самосогревания неветилируемого слоя травы составляет от 1,0 [36] до 2...3 °С/ч [58]. При низких значениях относительной влажности вентиляционного воздуха $\varphi_{\text{во}}$ дыхание обеспечивает более 25 % теплоты, требуемой для испарения, а при $\varphi_{\text{во}} > 75$ % – более 60 %. Однако биологические тепловыделения, ускоряющие процесс сушки, связаны с потерей сухого вещества продукции [29, 37, 58].

Начиная с середины прошлого века, сушка травы с применением активного вентилирования получает широкое распространение в мире. В настоящее время в нашей стране до 40 % сена заготавливается с использованием систем активной вентиляции (САВ). Такой значительный рост объемов заготовок с использованием САВ обусловлен рядом преимуществ.

Анализ отечественных и зарубежных исследований сушки травы при заготовке сена с использованием систем активной вентиляции [2, 4, 10, 17, 23, 25, 27, 29, 31, 34, 36, 37, 40, 47, 53, 54, 65 и др.] показал следующие преимущества таких технологий: уменьшение общего времени нахождения травы в поле до 1...3 дней; повышение в 1,7...2,0 раза качества грубых кормов; уменьшение влияния погодных условий из-за сокращения в 2...3 раза времени сушки; совершенствование технологичности процесса заготовки; сокращение механических потерь на 20...25 %.

Траву предварительно провяливают в поле до $\omega_{\text{тр}} = 35...45$ % при заготовке рассыпного и до $\omega_{\text{тр}} = 30...35$ % при заготовке прессованного сена. Первые двое суток продувка происходит непрерывно независимо от погоды. В дальнейшем САВ работают при относительной влажности воздуха $\varphi_{\text{во}} < 75...80$ % и $t_{\text{в}} > 15$ °С. В периоды кратковременных дождей вентиляторы не включают. Во время длительной непогоды при повышении температуры массы выше 40 °С ее охлаждают, периодически включая системы. Длительность сушки лежит в пределах 100...200 ч. Послойная сушка удлиняет процесс до 14...16 суток для рассыпного и 18...30 суток для прессованного сена. Поэтому скирды рекомендуется формировать за один день.

Активная вентиляция широко применяется при досушивании прессованного в тюки и рулоны сена. В этом случае скошенную траву прессуют при влажности 30...35 %. При досушивании прессованного сена в укороченных тюках расход воздуха на 16 % меньше в связи с увеличением интенсивности влагосъема. По этой же причине тюки с отверстиями сохнут в 2...3 раза быстрее, чем без отверстий.

Имеется положительный опыт сушки травы с начальной влажностью $\omega_{тр}$ до 50...60 % неподогретым воздухом без ухудшения качества кормов [5, 23, 25, 31, 34, 60, 65]. Нагрев воздуха сокращает время сушки, хотя он способствует увеличению потерь питательных веществ из-за разрушения белков при температуре выше 40...60 °С [29, 47] и из-за увеличения вероятности появления плесени в слое травы. По причинам экономии энергии предварительный подогрев воздуха не получил распространения в Германии [31, 36], сокращается в США [39].

Заготовка сена с использованием систем активной вентиляции, работающих на неподогретом воздухе, для Нечерноземной зоны России считается наиболее эффективной [2, 11, 23, 42].

Сено, убранное с применением САВ, лучше сохраняет питательные вещества (табл. 2.2) [11].

Т а б л и ц а 2.2

Сохранность питательных веществ в люцерне после 6 месяцев хранения, %

Метод уборки	Сухое вещество	Протеин	Каротин
Полевая сушка:			
без повреждения дождем	76	69	2,7
поврежденное дождем сено	63	55	0,6
Системы активной вентиляции:			
неподогретым воздухом	83	79	7,8
подогретым воздухом	86	80	11,8
Искусственная сушка	90	79	23,6

Потери питательных веществ при хранении кондиционного сена в хранилищах составляют 1...3 % в год [2, 34], в скирдах – 15...30 % и более [2, 21, 29, 35, 46], уменьшаясь при увеличении размеров скирд. Определен-

ные преимущества имеются при сушке и хранении сена под пленкой [5].

Нормы естественной убыли рассыпного и прессованного сена при хранении на открытой площадке приведены в табл. 2.3 [25].

Хранение рассыпного сена в поле без укрытия сопровождается потерями до 40 %, укрытие скирды пленкой снижает их до 30 %, а укладка сена под навес или в сенохранилище – до 5 %. Прессованное сено под навесом имеет сохранность до 99 %.

Использование углекислого газа, уменьшающего интенсивность окислительных реакций при хранении зеленых кормов, не нашло широкого применения из-за больших транспортных и эксплуатационных затрат на доставку и подачу углекислоты в травяную массу, а также из-за отсутствия герметичных хранилищ.

В таблицах 2.4 и 2.5 обобщены рекомендуемые в различных странах удельные расходы воздуха при сушке травы. Наблюдаемые значительные колебания расходов даже в пределах одной страны связаны, по нашему мнению, с недоучетом теплофизических, теплотехнических и экономических аспектов искусственной сушки травы.

Вентилировать солому, когда относительная влажность наружного воздуха $\varphi_n > 90 \dots 95$ %, нецелесообразно. Однако если температура соломы превышает 40 °С, то для ее охлаждения необходимо два раза в день кратковременное (на $20 \dots 25$ мин.) включение САВ. Чтобы предотвратить плесневение травы, срок сушки соломы до $\omega_{\text{сол}} = 20$ % не должен превышать срок появления плесневых грибков в травах. Для определения продолжительности сушки влагонасыщенной соломенной массы, содержащей траву, составлена номограмма (рис. 2.2) [21].

Пусть, например, для длительного хранения солому высушивают атмосферным воздухом с относительной влажностью $\varphi_b = 77$ % (точка 1), температура поступающего в слой воздуха $t_b = 15$ °С (точка 2). Если влажность имеющейся в соломенной массе травы $\omega_{\text{тр}} = 35$ % (точка 3), то массу необходимо высушить быстрее, чем за $\tau = 175$ ч (точка 4). Если $\omega_{\text{тр}} = 55$ % (точка 5),

Нормы естественной убыли (% по месяцам)

Месяц укладки	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май
Рассыпное сено												
Июнь	0,6	0,9	1,2	1,3	1,1	0,9	0,8	1,1	1,1	1,3	2,0	3,0
Июль	3,0	0,6	0,9	1,2	0,8	0,7	0,6	0,8	1,0	1,1	1,8	2,8
Август	2,8	3,0	0,6	0,9	0,7	0,5	0,4	0,6	0,7	0,9	1,6	2,6
Сентябрь	2,0	2,2	2,3	0,5	0,3	0,2	0,2	0,1	0,2	0,8	1,3	1,9
Октябрь	1,8	2,0	2,2	2,3	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,7	1,3	1,5
Ноябрь	1,5	1,7	1,8	1,9	1,8	0,0	0,0	0,0	0,1	0,6	1,2	1,4
Декабрь	2,0	2,5	3,0	3,9	3,7	3,2	0,0	0,0	0,2	1,0	1,9	2,2
Январь	2,3	2,6	2,9	3,3	3,2	3,1	2,9	1,0	0,1	0,9	1,6	2,0
Февраль	2,2	2,5	2,8	3,0	2,8	2,7	2,5	2,4	0,1	0,4	1,5	2,0
Март	1,6	1,7	1,8	1,9	1,9	1,9	1,7	1,6	0,6	0,1	0,6	1,5
Апрель	1,6	1,7	1,8	1,9	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3	1,5	0,2	1,4
Май	1,5	1,6	1,7	1,8	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3	1,4	1,7	0,5
Прессованное сено												
Июнь	0,3	0,6	0,9	0,7	0,5	0,3	0,0	0,1	0,3	0,4	0,7	1,2
Июль	1,9	0,2	0,5	0,6	0,4	0,2	0,0	0,0	0,2	0,3	0,6	1,6
Август	1,4	1,9	0,2	0,5	0,4	0,2	0,0	0,0	0,0	0,2	0,4	0,8
Сентябрь	1,5	1,8	2,0	0,3	0,2	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,3	0,6
Октябрь	0,9	1,2	1,5	1,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,4	0,7
Ноябрь	1,0	1,0	1,1	1,3	1,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3	0,7
Декабрь	2,1	2,5	2,9	3,2	3,0	2,5	0,0	0,0	0,0	0,6	1,3	1,8
Январь	2,0	2,1	2,4	2,9	2,8	2,8	2,7	0,0	0,0	0,4	1,2	1,7
Февраль	1,8	2,0	2,3	2,6	2,5	2,4	2,4	2,3	0,0	0,2	1,0	1,5
Март	0,8	0,9	1,1	1,2	1,1	0,9	0,7	0,8	0,9	0,1	0,3	0,5
Апрель	0,7	0,8	0,9	1,1	1,0	0,8	0,7	0,8	0,9	1,0	0,2	0,4
Май	0,6	0,7	0,9	1,0	0,9	0,7	0,6	0,8	0,8	0,9	1,1	0,3

Т а б л и ц а 2.4

Удельные расходы воздуха при сушке травы

Страна	$L, \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{ч})$	$L_m, \text{ м}^3/(\text{т.ч})$	Примечания	Источник
Рассыпное сено				
Россия	300	≥ 1200	-	[3]
	216	110^1	$\omega_{\text{тр}} < 35 \%$	[24]
	430	220^1	$\omega_{\text{тр}} = 35 \dots 45 \%$	[24]
	640	330^1	$\omega_{\text{тр}} = 45 \dots 65 \%$	[24]
	600...700	-	измельченная трава	[1]
Англия	-	840...3360	-	[34]
Германия	216...324	-	-	[66]
	-	800...1000	$\omega_{\text{тр}} = 30 \%$	[68]
	-	1500...1900	$\omega_{\text{тр}} = 40 \%$	[68]
	-	2500...3100	$\omega_{\text{тр}} = 50 \%$	[68]
	-	$1250 \dots 1550^2$	$\omega_{\text{тр}} = 40 \%$	[68]
	-	$2300 \dots 2900^2$	$\omega_{\text{тр}} = 50 \%$	[68]
	-	$1000 \dots 1250^3$	$\omega_{\text{тр}} = 40 \%$	[68]
	-	$2100 \dots 2600^3$	$\omega_{\text{тр}} = 50 \%$	[68]
	400...500	-	-	[36]
600...800	-	измельченная трава	[36]	
Голландия	-	840...1680	-	[34]
Прессованное сено				
Россия	900...1000	-	-	[3,24]
	800	-	сухая зона	[21]
	1200	-	влажная зона	[21]
	-	до 2500	-	[12]
Англия	820	-	-	[34]
Германия	600...1000	-	-	[36]

Т а б л и ц а 2.5

Удельные расходы воздуха, $\text{м}^3/(\text{т.ч})$, при сушке травы (Швеция) [63]

Начальная влажность травы, $\omega_{\text{тр}}, \%$	Неподогретый воздух		Подогретый на 5°C воздух	
	Первый укос	Второй укос	Первый укос	Второй укос
30	800	1000	-	-
40	1500	1900	800	1000
50	2500	3100	1800	2300
60	3500	4400	2500	3100

то солома должна быть высушена не позднее, чем за $\tau = 97$ ч (точка б).

Академиком А.В. Лыковым [28] разработана теория и получены аналитические уравнения для потоков теплоты и массы в капиллярно-пористых телах. Однако коэффициенты переноса и состояния сред в процессе сушки могут быть определены только экспериментально. Такие исследования для пористых изотропных сред при небольших градиентах темпера-

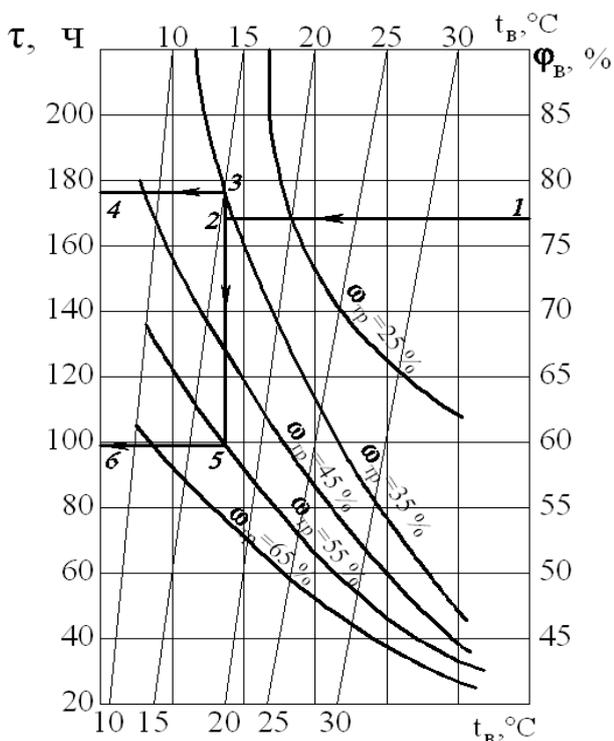


Рис. 2.2. Номограмма для определения продолжительности сушки соломы, содержащей траву

насыщена ($u_{\text{пов}} > u_{\text{г}}, p_{\text{нас}} = p_{\text{пов}} > p_{\text{в}}$), и вся теплота q_1 , переданная материалу, 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 в количестве q_2 .

Общее количество потребной теплоты:

$$q_1 + q_2 = r_0 G_c N(\tau) \left(1 + \frac{\omega - \omega_{\text{к}}}{\omega_{\text{тр}}}\right), \quad (2.1)$$

где $N(\tau)$ – 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 [17].

Качественно процесс сушки слоя травы при активном вентилировании (вынужденная конвекция) происходит следующим образом (рис. 2.3). Трава охлаждается по изоэнтальпе до температуры мокрого термометра $t_{\text{м}}$. Зона сушки начинает перемещаться в глубь слоя. В зоне сухого сена его

тур приведены лишь для ограниченного числа материалов [20] и не затрагивают биологически активные среды. Поэтому применение данной теории в практике инженерных расчетов сушки травы не представляется возможным.

Углубление зоны испарения на поверхности травы сопровождается уменьшением значений коэффициента теплоотдачи α_t и скорости сушки N . В период постоянной скорости сушки ($N = d\omega/d\tau = 0$) вся поверхность травы водо-

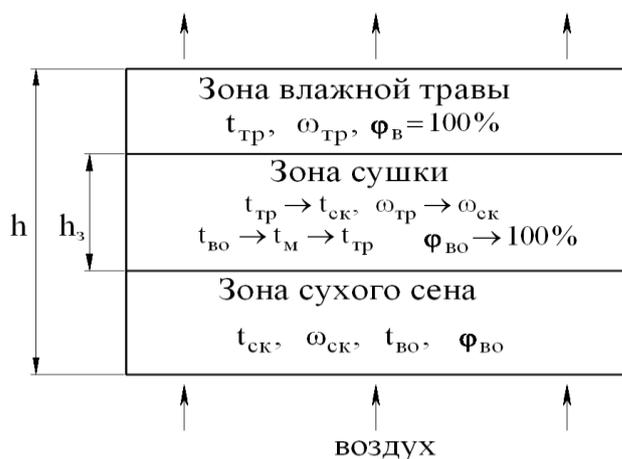


Рис. 2.3. Параметры сена и воздуха в слое высушиваемой травы

параметры $t_{ск}$ и $\omega_{ск}$ близки к равновесным с входящим в слой воздухом $t_{во}$ и $\phi_{во}$, испарение отсутствует. В зоне сушки температура $t_{во}$ сначала снижается до t_M , а затем в следующем по движению воздуха слое травы при относительной влажности воздуха ϕ_B , близкой

к 100 %, может возрасти до температуры влажной травы. Когда зона сушки начинает выходить за пределы слоя, относительная влажность воздуха ϕ_B на выходе из массы травы уменьшается, а температура возрастает. Чем больше времени зона сушки находится в слое (чем больше отношение $\bar{h} = h/h_3$), тем экономичнее процесс. Размеры зоны и скорость ее перемещения пропорциональны расходам воздуха L . Возрастание высоты \bar{h} может быть достигнуто или путем увеличения общей высоты слоя h или уменьшением расхода воздуха L . При влажности травы $\omega_{тр} < \omega_{г}$ зона сушки занимает всю толщину слоя, а $\phi_B < 100\%$. Такому явлению способствует подача большого количества сухого воздуха.

Увеличение влагопоглощающей способности воздуха за счет дыхания травы может быть определено по уравнению [37]:

$$\Delta d_c = d_k - d_o = 10^3 q_v G_c L r_o \rho_B. \quad (2.2)$$

Аналитические зависимости по определению времени сушки типа [28]

$$\tau = \frac{\omega_{тр} - \omega_k}{N} = 1 / \alpha_c N [1 + 2,31 \lg \alpha_c (\omega - \omega_k)] \quad (2.3)$$

не могут удовлетворить запросам практики, т.к. отсутствуют многофакторные значения скорости сушки травы $N = d\omega/d\tau$ в периоды постоянных и падающих скоростей сушки и относительного коэффициента сушки α_c . Наличие биологических тепловыделений и влаговыделений сохнувшей тра-

вы еще больше усложняет и практически делает невозможным аналитическое нахождение режимов работы систем активной вентиляции.

Рядом авторов для получения обобщенной методики расчета интенсивности процессов сушки травы предложено применять за основу $I-d$ -диаграмму влажного воздуха [21, 29, 31, 37, 55]. Изменение параметров воздуха в слое показано на рис. 2.4. При отсутствии испарительного эффекта максимальное влагопоглощение воздуха составляет $\Delta d_{\max} = d_2 - d_1$ (луч 1 – 2). Реальный процесс идет по изоэнтальпии $I = \text{const}$. При влагосодержании травы выше гигроскопической воздух насыщается влагой до $\varphi_{\text{в}} \approx 100\%$ (луч 1 – 3), его влагопоглощение равно $\Delta d_{\text{из}} = d_3 - d_1$. В гигроскопической области воздух насыщается до $\varphi_{\text{р}}$, соответствующей состоянию термодинамического равновесия с травой (луч 1 – 4), влагопоглощающая способность вентиляционного воздуха составляет $\Delta d_{\text{р}} = d_4 - d_1$. Дальнейшее повышение влагопоглощающей способности воздуха возможно путем повышения его температуры (луч 1 – 5). При $\Delta t = t_5 - t_1$ (луч 1 – 5) каждый кг воздуха поглощает $\Delta d_{\text{наг}} = d_6 - d_5$ г влаги (луч 5 – 6).

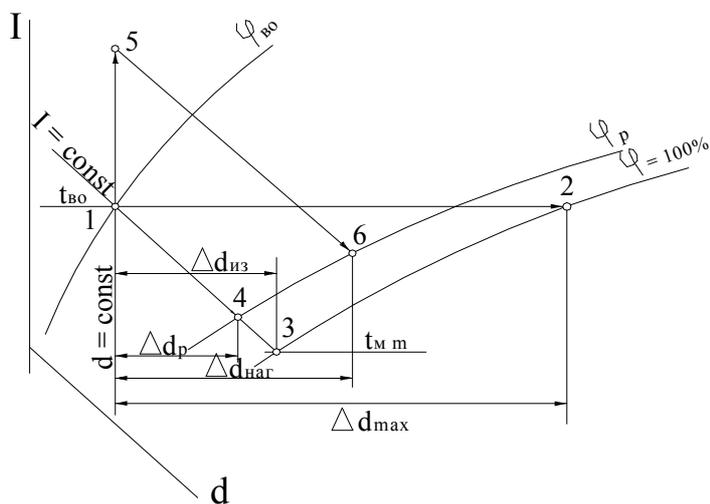


Рис. 2.4. Изменение параметров воздуха, продуваемого через слой сохнущей травы

Рассмотренные построения не раскрывают полностью возможностей $I-d$ -диаграммы влажного воздуха по повышению интенсивности влагопереноса в слое сохнущей травы, технико-экономических и энергетических показателей процессов сушки.

Таким образом, необходимы дополнительные аналитические и экспериментальные исследования по обоснованию и разработке теплофизической модели тепломассопереноса в слое травы, которые позволяют выя-

вить его энергетическую сущность, обосновать методику расчета режимов работы систем активной вентиляции, технико-экономические границы использования искусственного подогрева воздуха или иных способов интенсификации процессов сушки. В конечном итоге, появится возможность расширить границы применения $I-d$ -диаграммы влажного воздуха для анализа и расчета процессов сушки травы.

Заготовка сена в значительной степени зависит от влагопоглощающей способности наружного воздуха. Совпадение по времени периодов сушки травы ($\approx 15.06 \dots 15.07$) и наивысших годовых значений температуры наружного воздуха t_n при минимальных среднегодовых величинах относительной влажности воздуха φ_n благоприятствует интенсификации процесса [11, 31, 62].

Помимо температуры t_n и относительной влажности φ_n наружного воздуха качество кормов определяется продолжительностью погодных условий без дождей $\tau_{бд}$. Закономерности изменения трехпараметрических распределений ($t_n - \varphi_n - \tau_{бд}$) в летний период изучены недостаточно.

Температура воздуха и его относительная влажность меняются в больших пределах. Анализ конкретных метеорологических условий в период сенокоса в Литве [37] показал, что параметры воздуха в течение суток изменяются по следующим закономерностям:

$$t_n = 16,4 + 4,2 \sin \frac{\pi}{12} (\tau_c - 8,6); \quad (2.4)$$

$$\varphi_n = 71,0 + 17,3 \sin \frac{\pi}{12} (\tau_c + 3,4), \quad (2.5)$$

где τ_c – текущее время, ч;

$\pi/12$ – частота изменения, $^{\circ}\text{C}/\text{ч}$.

Для других климатических регионов нами аналогичных закономерностей в технической и специальной литературе не выявлено. Поэтому необходимо дополнительное изучение влагопоглощающей способности воздуха в летний период для различных климатических регионов страны.

Специалистами Германии разработана таблица для определения параметров атмосферного воздуха, при которых происходит удаление влаги из рассыпного, измельченного и прессованного сена злаковых и злаково-бобовых трав (табл. 2.6). Таблица получена на базе изотерм сорбции.

Т а б л и ц а 2.6

Определение параметров атмосферного воздуха при вентилировании сена злаковых и злаково-бобовых трав

Влажность травы, $\omega_{тр}$, %	Вентиляционный воздух холоднее сохнувшей травы, разность температур, °С							
	- 8	- 7	- 6	- 5	- 4	- 3	- 2	- 1
	Максимальные значения относительной влажности вентиляционного воздуха, $\phi_{в}$, %							
30	100	100	100	100	100	100	100	100
26...30	100	100	100	100	100	100	100	100
22...25	100	100	100	100	100	100	98	93
19...21	100	100	100	100	100	98	93	88
16...18	100	100	100	100	97	91	86	81
13...15	100	100	98	92	87	82	77	72

Продолжение таблицы 2.6

Влажность травы, $\omega_{тр}$, %	Вентиляционный воздух теплее сохнувшей травы, разность температур, °С							
	0	1	2	3	4	5	6	7
	Максимальные значения относительной влажности вентиляционного воздуха, $\phi_{в}$, %							
30	98	93	87	82	78	73	64	60
26...30	93	88	83	78	74	69	61	57
22...25	88	83	78	74	69	65	57	54
19...21	83	78	73	69	65	61	54	51
16...18	76	72	67	63	60	56	50	47

Пользуясь значениями табл. 2.6, можно определить значения температур $t_{в}$ и относительных влажностей $\phi_{в}$ воздуха, при которых происходит удаление влаги из кормов с различной начальной влажностью $\omega_{тр}$. Из этой же таблицы возможно получить условия обратного процесса – увлажнения приготавливаемого корма. Величина влажности травы определяется на глубине примерно 0,7 м от края скирды рассыпного или в середине тюков прессованного сена.

Практически таблицей пользуются следующим образом. Пусть измеренная температура в объеме скирды $t_{тр} = 18$ °С, влажность травы $\omega_{тр} = 27\%$. Параметры приточного воздуха: $t_{в} = 23$ °С; $\phi_{в} = 60$ %. Разница темпе-

ратур равна 5 °С, воздух теплее продукта. При $\omega_{\text{тр}} = 27 \%$ работа САВ возможна, т.к. $\varphi_{\text{в}} = 60 \%$, т.е. ниже предельного значения $\varphi_{\text{в}} = 69 \%$. Другой пример: $t_{\text{тр}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_{\text{в}} = 18 \text{ }^\circ\text{C}$; $\varphi_{\text{в}} = 98 \%$; $\omega_{\text{тр}} = 21 \%$. В этих условиях сушка невозможна, т.к. для этих условий предельное значение $\varphi_{\text{в}} = 93 \%$. Пользование предлагаемой таблицей предполагает постоянный контроль за температурой и влажностью сохнущей травы и не дает точного ответа о продолжительности процесса сушки.

Чтобы сократить период сушки травы и уменьшить потери питательных веществ и каротина, целесообразно проводить вентилирование подогретым воздухом. Подогрев воздуха до 30 °С уменьшает продолжительность сушки клеверно-тимофеечного сена в 2 раза по сравнению с неподогретым воздухом. Повышение температуры воздуха до 40 °С ускоряет сушку в 2,7 раза, а перегрев воздуха до 54 °С – в 3,5 раза. При сушке травы подогретым воздухом следует ограничивать время работы установки, т.к. повышается относительная влажность и температура воздуха в слое сохнущего материала, и происходит интенсивная конденсация водяных паров в еще не высохшей части травы. По этим причинам могут образовываться очаги плесени и гнили. Период одного цикла сушки перегретым на 8...10 °С воздухом не должен продолжаться более 30 ч, а при нагревании до 30...40 °С сушка должна быть закончена в течение 40 ч.

Действующие в Скандинавских странах нормы удельного расхода не подогретого и подогретого воздуха для сушки травы в течение 10 дней приведены в табл. 2.7.

Т а б л и ц а 2.7

Количество воздуха, м³/(т·ч), для сушки травы за 10 дней

Содержание влаги, $\omega_{\text{тр}}$, %	Атмосферный воздух		Воздух, подогретый на 5 °С	
	первый урожай	августовский урожай	первый урожай	августовский урожай
30	800	1000	-	-
40	1500	1900	800	1000
50	2500	3100	1800	2300
60	3500	4400	2500	3100

2.2. УСТРОЙСТВО СИСТЕМ АКТИВНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ

2.2.1. Полевые системы активной вентиляции

Принципиальным отличием искусственной сушки с применением систем активной вентиляции является возможность создания заданных параметров воздуха в объеме материала, подлежащего сушке, а также оперативного управления параметрами микроклимата в зоне действия САВ. При активной вентиляции воздух омывает практически каждое растение. Возникающая при этом интенсивная влагоотдача травы позволяет увеличить скорость и сократить время сушки, значительно уменьшить влияние погодных условий на эффективность процессов сушки, оперативно локализовать и ликвидировать очаги отпотевания и гниения в массе продукции. Неоспоримые преимущества САВ позволили им занять ведущее место в современной технологии сушки травы.

Принудительное вентилирование сохнущей травы в полевых условиях осуществляется с помощью систем активной вентиляции, принципиальная схема которых показана на рис. 2.5б.

Оборудование установки САВ, работающей на неподогретом воздухе, состоит из последовательно расположенных: вентилятора с электродвигателем; соединительного воздуховода; воздухораспределительного канала. Установки могут быть передвижными и стационарными. В стационарных САВ вентилятор обслуживает одну скирду или штабель, в передвиж-

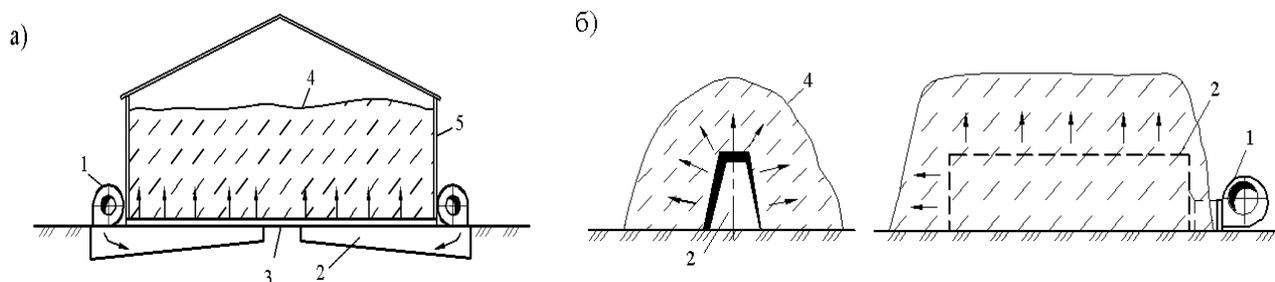


Рис. 2.5. Схемы систем активной вентиляции для сушки травы:

1 – вентилятор; 2 – воздухораспределительный канал; 3 – решетчатый пол; 4 – штабель сохнущей травы; 5 – хранилище

ных – несколько скирд или штабелей поочередно.

Промышленностью серийно выпускаются установки для досушивания измельченной, неизмельченной и прессованной сохнувшей травы в скирдах: УВС-10М и УВС-16А (табл. 2.8). Предусмотрено автоматическое управление работой вентиляционного оборудования. Подстожный канал первой установки состоит из трех секций для скирд длиной 12 м, канал второй установки – из пяти секций, длина скирды достигает 18...20 м.

Т а б л и ц а 2.8

Установки для досушивания травы

Конструктивные элементы	УВС-10М	УВС-16А
Подстожный канал:		
длина, м	10	19
масса, кг	970	1400
Вентилятор:		
марка	Ц4-70 №10	ЦАГИ К-23
частота вращения, об/мин	965	1450
производительность, тыс. м ³ /ч	36	50
Мощность электродвигателя, кВт	10 или 13	15

В установках активного вентилирования применяются центробежные (радиальные) вентиляторы типов Ц4-70 и Ц4-76 №10 и №12,5. Осевые вентиляторы общепромышленного назначения менее энергоемки, но они развивают низкое давление и имеют повышенную, по сравнению с радиальными вентиляторами, пожароопасность. При выборе типа вентилятора и потребляемой электродвигателем мощности особое внимание следует уделять соответствию его производительности и развиваемого давления необходимым показателям по расходу и давлению, полученным при аэродинамическом расчете в процессе проектирования установок активной вентиляции для сушки травы.

В качестве побудителей движения воздуха в САВ в полевых условиях могут применяться серийно выпускаемые промышленностью прицепные и навесные опрыскиватели: ОП-2000-01; ОПВ 2000; ОПШ-15-03; ОМ-630-2. Опрыскиватели агрегируются с тракторами МТЗ, ЮМЗ-6АКЛ, ЛТЗ-55, Т-30. Давление, развиваемое вентиляторами вышеперечисленных опрыс-

квивателей, достаточно для преодоления линейных и местных сопротивлений в реальных скирдах и штабелях. Технические характеристики опрыскивателей приведены в табл. 2.9.

Т а б л и ц а 2.9

Характеристики опрыскивателей

Марка	Тракторы, с которыми агрегатируются	Вентилятор	Производительность, м ³ /ч
ОВТ-1, прицепной	МТЗ, Т-588	Ц4-60 №6,3	10950
ОН-400, навесной	МТЗ	Ц4-60 №6,3	18200
ОП-1600-1, прицепной	МТЗ 80/82, Т-74, КМЗ-6Л	Ц4-60 №6,3	6000
ОШУ-50А, навесной	Т-25А, Т-40М, Т-54В, МТЗ	Ц4-60 №6,3	6000

Масса закладываемой на досушку травы $G_{тр}$, которую можно высушить на имеющейся установке производительностью L_v определяется по формуле:

$$G_{тр} = L_v / L_m. \quad (2.6)$$

Значения расхода воздуха на единицу массы травы L_m , м³/(т.ч), принимаются с учетом способа его раздачи в слой рассыпной или прессованной сохнувшей травы. На практике значения удельных расходов воздуха при сушке травы в скирдах лежат в пределах $L_m = 1500 \dots 2000$ м³/(т.ч) [11].

Воздухораспределительные подстожные каналы изготавливаются из профильного металла или из подручных материалов (доки, жерди и т.п.). В сечении они представляют треугольник или трапецию, делают их цельными или составными (из нескольких секций).

Длина канала зависит от размеров скирды, но не должна превышать по требованиям гидравлики 18 м (рис. 2.6). Канал, как правило, на 1,5...2,0 м короче скирды. Площадь отверстий в стенках канала составляет не менее 50 % от его общей поверхности. Площадь поперечного сечения канала со стороны вентилятора должна выбираться из условия скорости воздуха в нем до 10...12 м/с. Каналы выполняются как с постоянным поперечным сечением, так и с переменным. В последнем случае сечение противоположного от входного отверстия конца канала должно равняться примерно 1/3 от площади входного сечения. Со стороны вентилятора канал пример-

но на 1,5...2,0 м закрывается по всему периметру, его задняя торцевая стенка также сплошная. В удлиненных скирдах или штабелях к воздухо-распределительному каналу возможно присоединение по торцам двух вен-тиляторов, перемещающих воздух навстречу друг другу. Этим достигается удвоение объема высушиваемого материала. По середине канала рекомен-дуется делать перегородку.

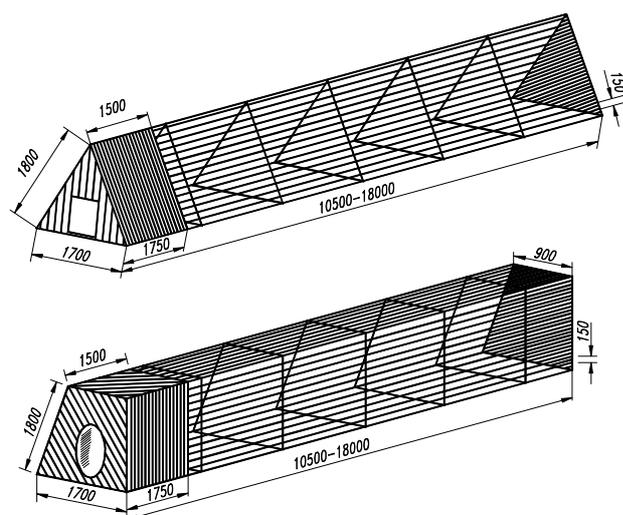


Рис. 2.6. Конструкция воздухораспределительных каналов (размеры в мм)

При досушивании прессованного сена воздухораспределительный канал, как правило, выполняется непосредственно из тюков. Высота его не менее 1,0 м, ширина 0,8...0,9 м, длина короче штабеля на 1,5...2,0 м. В случае использования воздухораспределителей тюки укладываются так, чтобы минимальная толщина слоя от канала до наружной поверхности штабеля была не менее 1,5...2,0 м.

Следует особо следить, чтобы при работе систем активной вентиля-ции все каналы были покрыты слоем травы одинаковой толщины, что спо-собствует равномерной сушке. Сохнущую траву нельзя утаптывать. Когда сушка происходит послойно, высота каждого слоя принимается около 1,5...2,0 м. Чтобы не нарушать точности процесса при послойной уклад-ке травяной массы на воздухораспределители, сушка должна вестись одно-

временно на нескольких заранее смонтированных установках САВ. Однако предпочтение следует отдавать сушке полностью сформированных скирд в течение одного дня.

При укладке травы следует выполнять следующие основные требования: выбирать возвышенные места, не подтопляемые дождевыми и паводковыми водами; плотно утрамбовывать земляные площадки; середина скирды всегда должна быть выше краев; верхушку скирды следует укреплять жердями, прутьями, проволокой с грузом, чтобы только что уложенная трава не сдувалась ветром; вокруг воздухораспределителя укладывать слой соломы или сухих веток толщиной 0,2...0,3 м для предотвращения порчи сена при длительном хранении; стремиться к формированию скирд и штабелей из травяной массы с постоянной влажностью.

Определение объема скирд V_c , м³, проводится по следующим зависимостям [11]:

– скирды кругловерхие низкой и средней высоты

$$V_c = (0,52l - 0,45b)bz; \quad (2.7)$$

– скирды кругловерхие высокие

$$V_c = (0,52l - 0,46b)bz; \quad (2.8)$$

– скирды плосковерхие

$$V_c = (0,52l - 0,55b)bz; \quad (2.9)$$

– скирды островерхие (шатровые)

$$V_c = lbz/4. \quad (2.10)$$

В формулах (2.7)...(2.10): l – длина перекидки, т.е. расстояние от земли с одной стороны скирды через верх до земли с другой стороны земли, м; b и z – соответственно ширина и длина скирды, м.

Длина и ширина измеряются на высоте груди с обеих сторон скирды и для расчетов используются средние данные.

Для предотвращения увлажнения сена атмосферными осадками в периоды сушки и хранения скирды и штабели рекомендуется укрывать син-

тетической пленкой или укладывать их под навесы. Пленочное укрытие должно иметь продухи для удаления из объема продукции влажного воздуха при работе систем активной вентиляции и предотвращения увлажнения сена во время хранения, вызванного конденсацией водяных паров на внутренней поверхности пленки при колебаниях температуры наружного воздуха. Наиболее простой конструкцией продухов являются зазоры между полотнами пленки в местах их нахлеста (рис. 2.7). Зазоры заполняются сеном и имеют протяженность по длине всей поверхности скирды в каждом месте нахлеста одного полотна пленки на другое. На рисунке приведены минимальные размеры продухов. Основным недостатком таких укрытий является быстрый выход из строя пленки под действием ветра и отрицательных температур и вызванная этим явлением необходимость неоднократной замены ее даже в течение одного сезона.

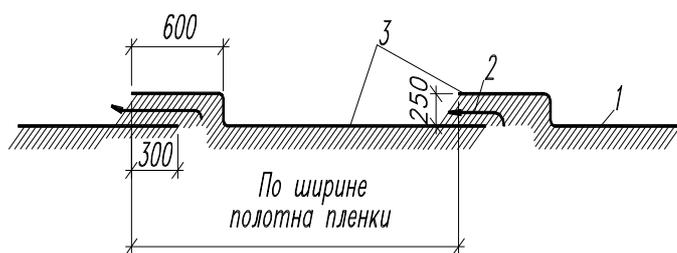


Рис. 2.7. Схема пленочного укрытия скирды:
1 – скирда; 2 – продухи; 3 – пленка

На рис. 2.8 приведена разработанная нами площадка для сушки и хранения рассыпного и прессованного сена с использованием систем активной вентиляции, работающих на

неподогретом атмосферном воздухе. Площадка предварительно укатывается катком, обносится изгородью и окапывается рвом шириной 2,0 м и глубиной 1,5 м. Выбранный грунт укладывается на внутреннюю бровку траншеи, образуя земляной вал высотой 1,0...1,5 м. Траншея и земляной вал предотвращают сено от паводкового увлажнения. Противопожарные разрывы должны составлять между скирдами 25...30 м, расстояние до изгороди – не менее 15 м, до неотапливаемых помещений – не менее 30 м и до отапливаемых (в том числе животноводческих) – не менее 100 м. Подъезды к площадке должны иметь твердое покрытие. Над электродвигателями вентиляторов необходимо сделать навес.

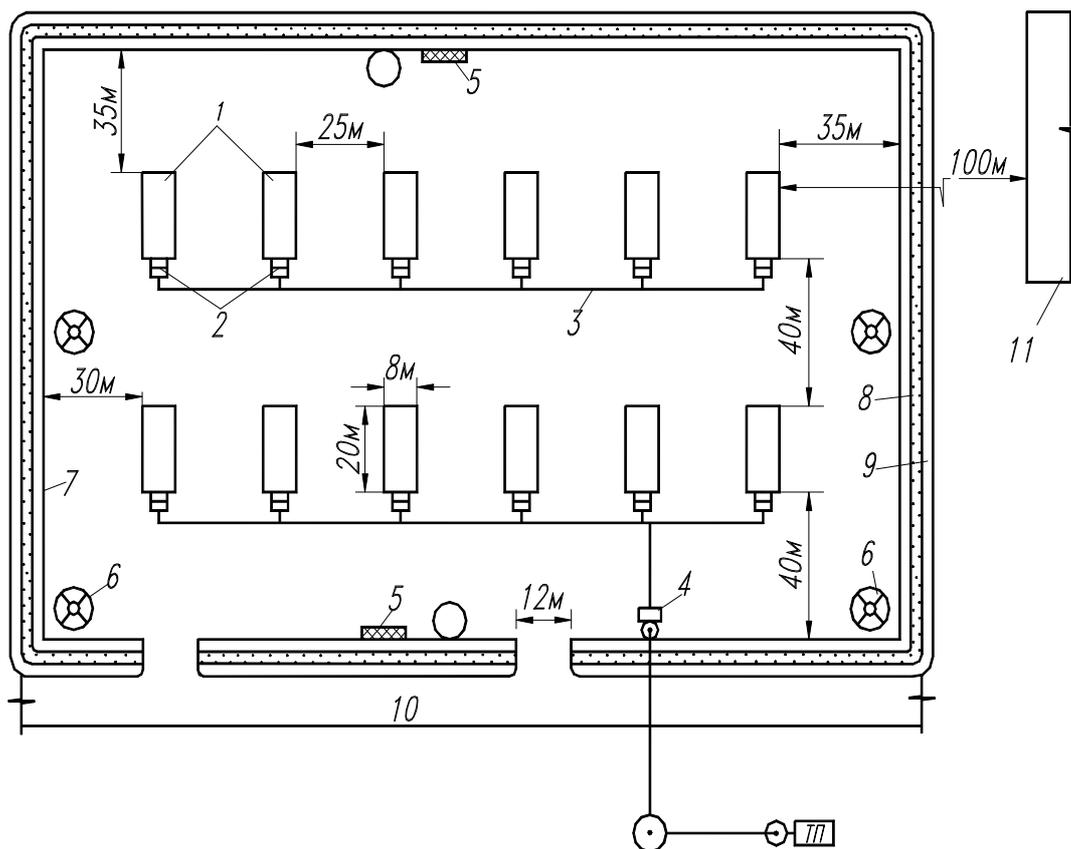


Рис. 2.8. Площадка для сушки неподогретым воздухом и последующего хранения рассыпного и прессованного сена (на 600 т продукции):

1 – скирды сена; 2 – вентиляторы Ц4-70 или Ц4-76 №10 или 12,5 с электродвигателями; 3 – силовая линия; 4 – электрораспределительный щит; 5 – противопожарные пункты с емкостями для воды; 6 – грозозащита; 7 – забор; 8 – земляной вал; 9 – водозащитный ров; 10 – асфальтированная дорога; 11 – животноводческое здание

Сенные площадки рекомендуется располагать вблизи животноводческих ферм. Это позволяет рационально организовывать досушивание сена, вести постоянный контроль за процессом хранения, сокращать затраты на доставку сена животным в стойловый период.

2.2.2. СИСТЕМЫ АКТИВНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ СЕНОХРАНИЛИЩ

Строительство закрытых сенохранилищ с активной вентиляцией (рис. 2.5а) является в настоящее время перспективной тенденцией в технике сушки и хранения грубых кормов.

В стране разработаны и реализуются типовые проекты навесов для хранения сена вместимостью 60, 100 и 200 т (табл. 2.10). В этих типовых

проектах предусматривается деревянный или металлический каркас, стены обшиты досками или волнистыми асбоцементными листами, кровля выполнена из асбоцементных листов. Применение систем активной вентиляции обязательно.

Т а б л и ц а 2.10

Основные характеристики навесов для хранения сена

Показатель	Значения показателей при вместимости навесов, т		
	60	100	200
Площадь навесов, м ²	168	280	560
Длина, м	12	20	40
Высота стен, м	5,18	5,18	5,18
Ширина, м	9	9	9

Необходимая вместимость сенохранилищ для различных ферм крупного рогатого скота приведена в табл. 2.11. В расчетах принята средняя норма сена на одно животное – 6 кг в сутки при продолжительности стойлового периода 215 дней. Из таблицы видно, что для хранения измельченного и прессованного сена требуется примерно в два раза меньший объем, чем для неизмельченного рассыпного сена.

Т а б л и ц а 2.11

Вместимость сенохранилищ

Показатель	Значение показателя для ферм с количеством голов КРС				
	400	600	800	1200	2000
Масса сена, т	516	774	1032	1548	2580
Вместимость сенохранилищ, тыс. м ³ :					
рассыпное сено, $\rho_c = 65 \text{ кг/м}^3$	7,95	11,9	15,9	23,8	39,7
прессованное сено, $\rho_c = 110 \text{ кг/м}^3$	4,7	7,05	9,4	14,05	23,45
Вместимость сараев для измельченного сена, тыс. м ³ , $\rho_c = 110 \text{ кг/м}^3$	5,75	8,6	11,45	17,2	28,65
Вместимость башен, тыс. м ³ , $\rho_c = 110 \text{ кг/м}^3$	3,95	5,95	7,95	11,9	19,85

Конструктивные особенности установок для сушки травы и хранения сена весьма многообразны. Это сенохранилища с напольными воздухораспределяющими устройствами различной конфигурации, имеющими регу-

лирующую арматуру для отключения части каналов; установки с двухъярусной раздачей воздуха, когда один из каналов расположен в слое сена на некоторой высоте; системы с нагнетанием и отсосом воздуха через центральный вертикально расположенный канал в хранилищах башенного типа высотой до 15 м.

В нашей стране наибольшее распространение получили системы активной вентиляции с напольными воздухораспределителями. В помещениях шириной до 7 м воздухораспределители могут состоять только из главного канала. При ширине более 7 м по обе стороны главного канала надо устраивать ответвления или решетчатый пол. САВ сенохранилищ могут работать как на подогретом, так и на неподогретом воздухе.

Ускорение сушки достигается подогревом воздуха. Особенно эффективно это в дождливую погоду. Промышленностью налажен серийный выпуск установок для досушивания травы системами активной вентиляции с подогревом наружного воздуха.

Установка УДС-300 для досушивания рассыпной и прессованной травы в хранилищах работает на неподогретом и перегретом на 2,5 °С по сравнению с атмосферным воздухом. Производительность 20 тыс. м³/ч.

Она включает осевой вентилятор МЦ №8 с электродвигателем, систему воздухораспределения, электрический трубчатый воздухонагреватель мощностью 15 кВт и щит управления. Система воздухораспределения представляет собой центральный канал с распределительными трубами. Вентилятор расположен снаружи хранилища. Общая потребляемая установкой мощность равна 19,5 кВт, масса составляет 695 кг, обслуживает ее один человек.

Увеличение значений перегрева воздуха на десятки градусов по отношению к атмосферному воздуху достигается в воздухонагревателях ВПТ-400 и ВПТ-600, серийно выпускаемых отечественной промышленностью, технические характеристики приведены в табл. 2.12. Недостатком этих аг-

регатов является сравнительно высокая степень перегрева воздуха, что при послойной сушке приводит к пересушиванию первого по ходу горячего воздуха слоя травы и к нерациональному использованию энергии.

Т а б л и ц а 2.12

Основные технические характеристики воздухонагревателей

Показатель	ВПТ-400	ВПТ-600
Теплопроизводительность при работе с теплообменником, тыс. кДж/ч	до 1256	до 1884
Расход керосина или керосина с моторным топливом, кг/ч	до 40	до 60
Перегрев воздуха, °С	до 53	до 40
Производительность по воздуху, м ³ /ч	до 25 000	до 40 000
Развиваемое давление, Па	600...800	до 900
Марка осевого вентилятора	К-06 № 8	К-06 № 10
Частота вращения, об./мин	1450	1460
Масса, кг	1100	1430
Габариты: длина, м	4,13	4,71
ширина, м	1,2	1,4
высота, м	2,22	2,54

Измерение температуры и влажности сена и травы ведется на глубине до 0,8...1,0 м от поверхности слоя. Температура фиксируется обычными термометрами. Определение температур по всему объему продукции может осуществляться потенциометром с комплектом протарированных термопар. Термопары должны закладываться при формировании скирд или заполнении хранилищ, что в реальных условиях хозяйств затруднено из-за большой трудоемкости этой операции и отсутствия необходимого количества измерительных устройств.

Влажность травы и сена на практике определяют по органолептическим качествам продукции (табл. 2.13).

Применение таких несовершенных, зависящих от вторичных свойств продукции, методов вызвано отсутствием в хозяйствах приборов для оперативной постоянной регистрации влажности травы и сена. Лабораторный способ определения влажности, основанный на взвешивании материала в процессе удаления из него влаги в сушильных шкафах, трудоемок и довольно продолжителен. Этим способом можно определить влажность тра-

Ориентировочное определение влажности травы и сена

Влажность, %	Луговое сено	Сено из бобовых трав
80...70	Свежескошенная трава	Свежескошенная трава
70...50	Листья обвяли, их окраска поблекла, стебли свежие и зеленые	Листья обвяли, их окраска посветлела
50...40	Листья еще мягкие, стебли обвяли, их окраска поблекла	То же, опадение листьев не наблюдается
40...30	Листья начинают крошиться, стебли еще гибкие, цвет травы блеклый	То же, начинают обламываться черенки листьев
30...25	Листья высохли, крошатся, надавив ногтем, еще можно выдавить сок	То же, черенки листьев очень ломкие
25...20	Стебли еще мягкие, но сок из них не выдавливается	То же, черенки листьев очень ломкие
менее 20	Стебли ломкие, излом прямой	То же, черенки листьев очень ломкие

вы или сена в слое глубиной не более 0,7...0,8 м, т.е. доступной для руки человека.

2.2.3. Устройство и эффективность гелиоустановок для подогрева воздуха при сушке травы

Наиболее перспективным источником теплоты для подогрева воздуха является солнечная энергия, главные достоинства которой: экологическая чистота; возобновляемость; практически неограниченные возможности для применения в сельскохозяйственном производстве.

Средняя месячная суммарная солнечная радиация в июне-июле месяцах в Нижегородской области составляет 650 МДж/м², средняя месячная продолжительность солнечного сияния за этот же период равна 300 ч. Этот факт позволяет сделать вывод о целесообразности использования солнечной энергии в существующих установках по сушке травы.

Поступающая на Землю солнечная энергия преобразуется в тепловую или электрическую в гелиоустановках. Опыт эксплуатации гелиоустановок показал, что даже при малой интенсивности солнечной радиации обеспечивается подогрев воздуха на 3...5 °С, что соответствует снижению относительной влажности воздуха на 15...25 % [33]. При этом общие энер-

гетические затраты на сушку растительного сырья с применением САВ сокращаются на 40...50 % [45].

Важно отметить, что при подогреве воздуха в гелиоколлекторе появляется возможность изменить сроки продувки в течение суток, т.е. начинать процесс активного вентилирования на 2,0...2,5 ч раньше обычного или позже заканчивать. Мягкие режимы сушки и сокращение времени вентилирования способствуют получению корма высокого качества [32, 41].

Широкое распространение получили коллекторы с лучепоглощающей поверхностью. Такие солнечные теплогенераторы не требуют следящих за солнцем систем, просты в конструкции и монтаже, могут быть изготовлены из более дешевых материалов, позволяют утилизировать не только прямое излучение, но и рассеянную радиацию.

Коллекторы с лучепоглощающей поверхностью в зависимости от типа теплоносителя бывают жидкостного (водяного) и воздушного типов. Последние более перспективны для интенсификации процессов сушки растительного сырья.

Наибольшее применение нашли плоскорамные коллекторы, которые могут быть установлены непосредственно на несущих конструкциях сооружений. В качестве теплоносителя в этом случае используют зачерненную кровлю и боковые стенки здания. Для увеличения теплообмена между тепловоспринимающей поверхностью коллектора и воздушным потоком поглощающую поверхность (т.е. крышу и боковые стены) целесообразно сделать волнистой, например из шифера. Увеличение турбулентности потока ведет к повышению *КПД*. По результатам опытной проверки температура воздуха повышается в среднем на 2...5°C [37]. Использование аналогичного стационарного пункта для досушивания травы в климатических условиях юга Западной Сибири позволяет сэкономить около $320 \cdot 10^3$ кВт·ч электроэнергии (примерно 40 т у.т.) [49].

Другой тип коллектора – коаксиальный, состоит из двух труб: верхней – из прозрачной пленки или пластика и внутренней – из черной пленки

или пластика. Трубы надуваются специальным вентилятором либо вентилятором, подающим воздух в сушильную установку. Чаще всего коллекторы такого типа выполняются разборными (переносными), что позволяет их легко перевозить и монтировать на месте. После окончания сушки коллекторы демонтируют и складывают до следующего сезона. Они широко используются как для сушки травы, так и для сушки семян и зерна [37].

Главным недостатком приведенных выше конструкций является то, что они могут работать только в дневное время, притом степень нагрева воздуха в течение дня неодинакова. Такой недостаток устраняется за счет накопления части тепловой энергии, поступающей в солнечное время суток, и отдачи ее в вечернее и ночное время. В качестве накопителя может быть использован любой теплоемкий материал.

Для определения возможной величины дополнительного подогрева атмосферного воздуха за счет солнечного подогрева и определения эффективности использования данной технологии в практике послеуборочной обработки растительного сырья нами были проведены эксперименты в реальных условиях. Эксперименты проводились в аналогичных сенохранилищах, оборудованных пассивными солнечными коллекторами, на территориях СПК «Жигули» Самарской области и совхоза «Зубилихинский» Нижегородской области. Реконструкции сенохранилищ проводились по проектам, разработанным к.т.н., доцентом Е.С. Козловым [24].

Рассмотрим сенохранилище в совхозе «Зубилихинский» (рис. 2.9). Оно представляет собой закрытое помещение размером в плане 9х42 м, высотой 4,5 м. Для осуществления активного вентилирования в хранилище смонтированы две системы приточной вентиляции *П1* и *П2* с центробежными вентиляторами *В* ВЦ 4-70 №10 производительностью $L_v = 35\ 000\ \text{м}^3/\text{ч}$ каждый. Продувка осуществляется через съемные подстожные каналы 4, соединенные с вентиляторами магистральными воздуховодами 2. Технологический процесс заготовки предусматривает посекционное заполнение всего объема хранилища, начиная с противоположной от вентиляторов

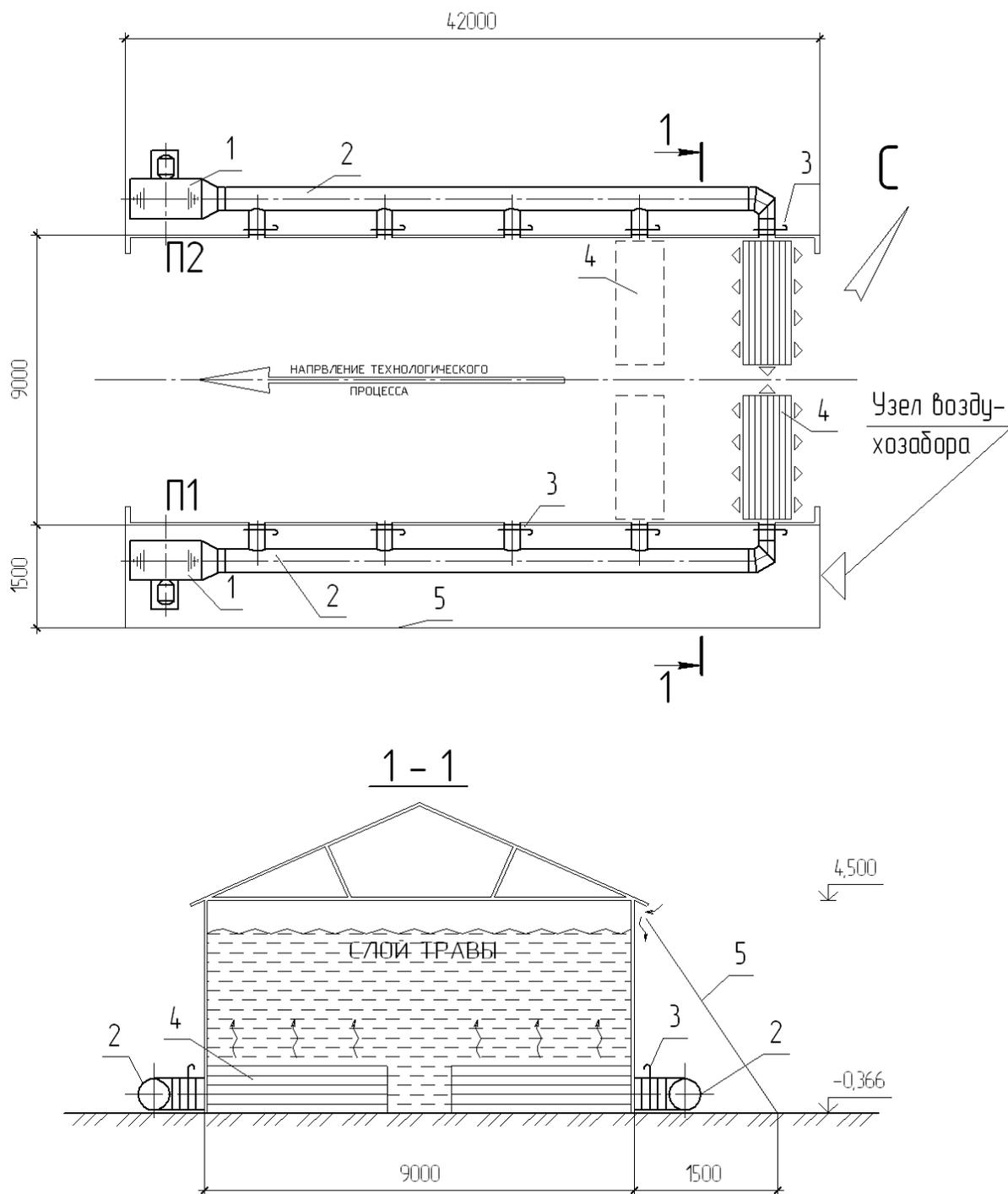


Рис. 2.9. Сенохранилище с пассивным солнечным коллектором в совхозе «Зубилихинский»

секции. Заполнение каждой последующей секции осуществляется после того, как влажность высушиваемой в секции травы достигает кондиционной. Масса травы в каждой секции ≈ 35 т. При такой закладке сырья удельный расход воздуха составляет $L_{уд} \approx 2\,000$ м³/ч на тонну сена. В период продолжительного хранения производится периодическое включение нес-

кольких подстожных каналов с регулировкой требуемого расхода шиберами 3.

Система пассивного подогрева воздуха за счет солнечной энергии представляет собой армированное прозрачное пленочное покрытие 5, выполненное по деревянному каркасу, перекрывающее объем, в котором размещено оборудование системы III. В качестве тепловоспринимающего слоя использован слой котельного шлака толщиной 100 мм. Нагрев воздуха осуществляется за счет теплообмена со стеной хранилища (коэффициент поглощения солнечной радиации $\beta = 0,89$), теплоаккумулирующим слоем ($\beta = 0,93$) и окрашенным в черный цвет металлическим воздуховодом $d = 800$ мм ($\beta = 0,95$).

Измерение параметров атмосферного воздуха (t_n, ϕ_n) проводилось с северной стороны сенохранилища, приточного воздуха ($t_{во}, \phi_{во}$) – в зоне узла регулирования и подогрева воздуха (t_b) вблизи всасывающего отверстия вентилятора. Измерения осуществлялись с помощью прибора для комплексного измерения параметров климата TESTO 455. Погрешность замера температуры составляла $0,3$ °С, относительной влажности воздуха – до 2 %.

Минимальная величина перегрева наружного приточного воздуха $\Delta t_{\min} = (t_{во} - t_n)$ составила $2,9$ °С, что привело к снижению относительной влажности на ≈ 13 %. Максимальное значение повышения температуры достигало $\Delta t_{\max} = 7,3$ °С.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о целесообразности использования пассивных гелиосистем для интенсификации процессов сушки травы активным вентилированием.

Глава 3. Теплофизические основы графоаналитического расчета интенсивности влагообмена в слое сохнувшей травы

3.1. ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАСЧЕТА ИНТЕНСИВНОСТИ СУШКИ ТРАВЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ $I-d$ -ДИАГРАММЫ

Сушка представляет собой сложный теплофизический процесс, обусловленный различными явлениями, происходящими в траве и в окружающей ее среде. 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 (или того и другого одновременно) из внутренних слоев материала к его поверхности.

В период хранения высушенного сена как температурные, так и влажностные поля внутри массы практически не зависят от теплофизических показателей продукта и следуют с некоторым отставанием за параметрами атмосферного воздуха.

Сушка травы атмосферным воздухом с помощью САВ сопровождается удалением влаги из всего объема продукции путем поглощения водяных паров продуваемым через слой травы воздухом. При этом биологические и микробиологические тепловыделения за счет дыхания травы и интенсивного развития микроорганизмов вызывают самосогревание массы. Процесс сушки травы неподогретым атмосферным воздухом характеризуется температурным режимом, когда температура травы t_k выше температуры приточного воздуха t_b .

Скирды рассыпной и штабели прессованной травы могут быть представлены параллелепипедами конечных размеров с источниками тепло- и влаговыделений, равномерно распределенными по всему объему.

Процессы обработки воздуха, приведенные на рис. 2.4, не учитывают влияния на процессы тепломассообмена биологической теплоты самосо-

гревания и не позволяют выявить возможные зоны конденсации водяных паров в слое и пути предотвращения их образования. Для построения процессов обработки воздуха с учетом указанных требований необходимо выявить и обосновать их направления в слое сохнущего материала (рис. 3.1).

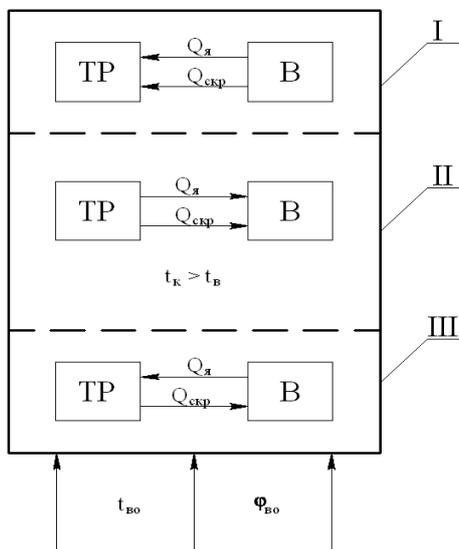


Рис. 3.1. Направления тепло- и массопереноса в слое сохнущей травы при $t_k > t_{во}$: I – слой активно сохнущей травы (корректирующий); II – основной слой; III – поверхностный слой

рого термометра t_{MT} (рис. 3.2). Биологические тепловыделения нарушают адиабатность процесса, смещая луч процесса насыщения воздуха от линии $I = const$ (процесс $A-B$). Увеличение ассимилирующей способности воздуха Δd_g пропорционально предварительному подогреву воздуха на величину $\Delta t_{во}$ (процесс $A-A_1$), что может быть записано в виде балансового уравнения:

$$G_k(c_{тр}\Delta t_{во} + q_{CPC}) = \Delta d_g L_{вp} r, \quad (3.1)$$

где G_k – масса корректирующего слоя растительного сырья.

В процессе сушки слой активно сохнущей травы перемещается по направлению движения воздуха. Приближение влажности поверхностного слоя к гигроскопической обуславливает снижение интенсивности влагообмена, т.е. процесс переходит в период падающей скорости сушки. Момент наступления гигроскопического равновесия между объектом сушки и сушильным агентом определяется изотермами сорбции-десорбции (рис. 1.2).

Первый по ходу движения воздуха слой травы будем называть корректирующим. При начальной влажности сырья выше гигроскопической ($\omega_{тр} > \omega_r$), механизм влагообмена аналогичен процессу испарения с открытой поверхности воды. Воздух увлажняется по изоэнтальпе AG до равновесной относительной влажности ϕ_p , близкой к 100 %. Его температура понижается до t_G , мало отличающейся от температуры мок-

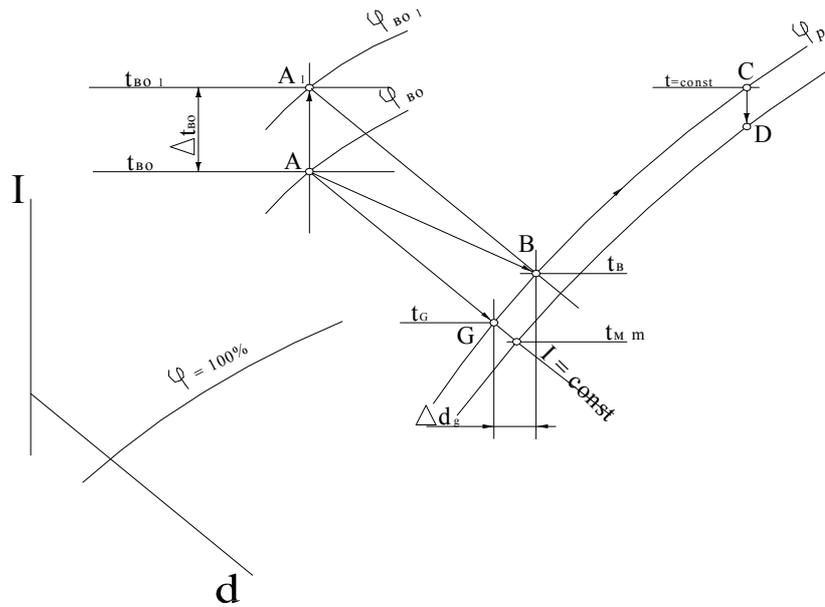


Рис. 3.2. Изображение на $I-d$ -диаграмме изменения состояния воздуха в слое сохнущей травы при $t_k > t_{Bo}$

Характер изменения состояния воздуха в корректирующем слое материала, влажность которого ниже гигроскопической ($\omega_{тр} \leq \omega_r$) отличается от рассмотренного выше. Если разделить первый по ходу воздуха слой на несколько зон (рис. 3.3а) и предположить, что изменение параметров сушильного агента в процессе сушки происходит скачкообразно в центре каждой зоны, а интенсивность биологических тепловыделений постоянна

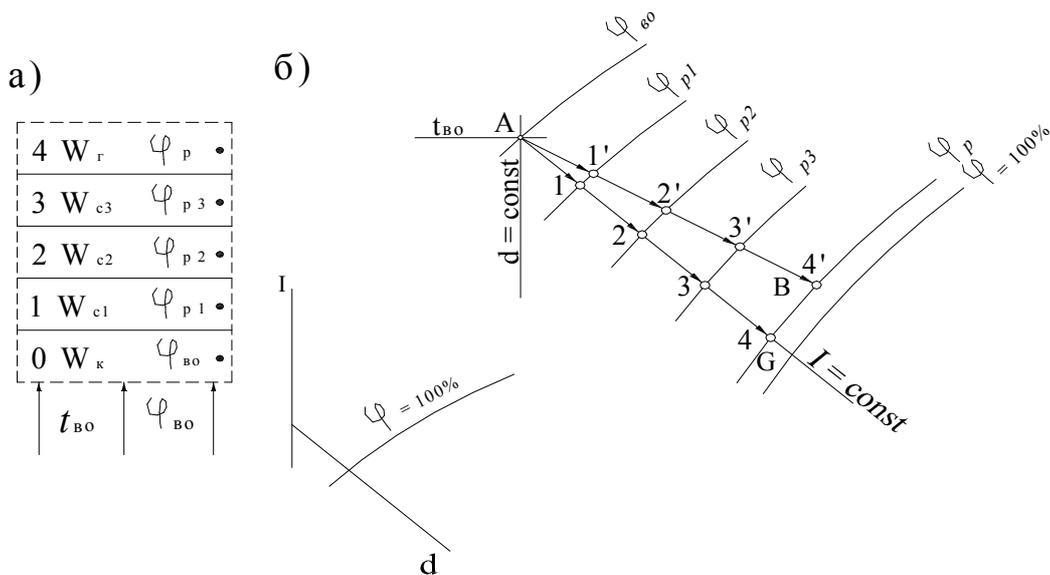


Рис. 3.3. Изменение состояния воздуха в слое травы при $\omega_{тр} < \omega_r$:
 а – деление слоя на зоны; б – изображение процессов на $I-d$ -диаграмме

I-d-диаграмме. Рассуждая аналогично, дальнейшее построение позволяет получить линию $aa'a''...a^n$, описывающую реальный процесс обработки воздуха в основном слое травы. Линия $aa'a''...a^n$ представляет собой кривую равновесной относительной влажности $\varphi_p = \text{const}$, эквидистантную кривой $\varphi = 100\%$ в направлении движения воздуха.

Представленные построения наглядно показывают несоответствие психрометрической теории реальным процессам при сушке биологически активного сырья и подтверждают невозможность достижения значения равновесной относительной влажности воздуха $\varphi_v = 100\%$. Необходимо учитывать, что увеличение по любой причине первоначального сорбционного потенциала воздуха Δd (линия φ_p отклонится влево по лучу $a-f$) неизбежно приведет к увеличению интенсивности испарения влаги с поверхности продукции. В результате процесс вернется в первоначальное состояние на линию $\varphi_p = \text{const}$. С другой стороны, если по какой-либо причине влагосодержание воздуха увеличится, то кривая φ_p отклонится вправо (процесс $a-e$), что повлечет за собой уменьшение интенсивности испарения с поверхности травы. Графически процесс вернется на линию к прежнему значению из-за наличия биологических тепловыделений сохнущей травы, постоянно уменьшающих величину относительной влажности воздуха в слое. Таким образом, гипотетические процессы $a-f$ и $a-e$ противоречат физической сущности процессов теплообмена в основном слое сохнущей травы.

Все вышесказанное представлено в виде результирующего процесса обработки воздуха $B-C$ (рис. 3.5), показывающего, что в основном слое сохнущего биологически активного материала ассимиляция влаги воздухом происходит даже при $\varphi_p \rightarrow 100\%$.

На практике часто имеют место случаи, когда температура поверхности слоев сохнущего сырья (скирд, тюков) оказывается ниже температуры внутренних слоев (например, при неработающей активной вентиляции). Тогда при включении САВ возникает *поверхностный слой III* (рис. 3.1.) В

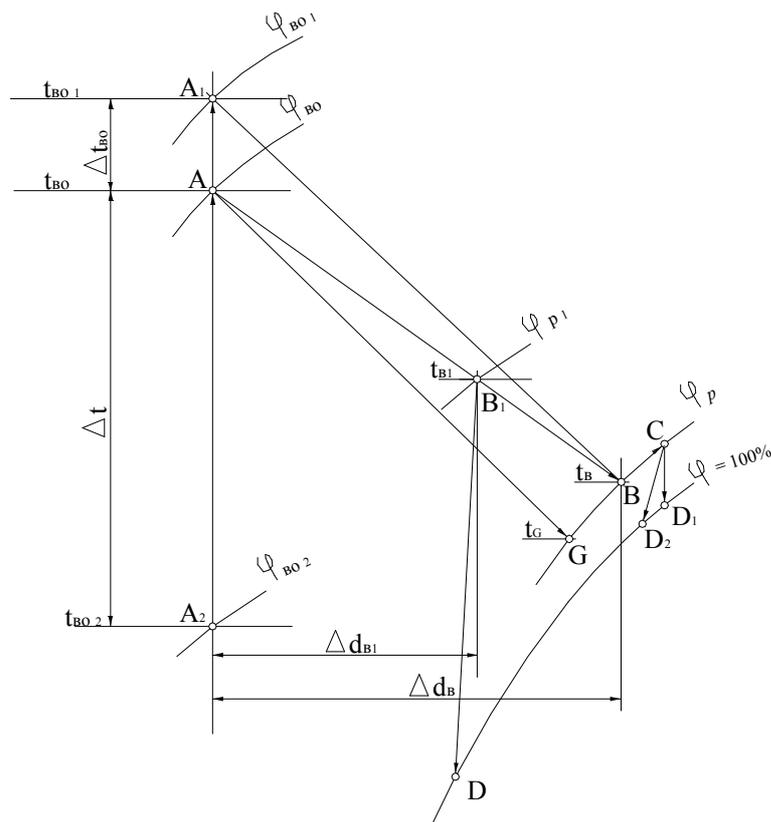


Рис. 3.5. Изменение состояния воздуха в слое активно сохнущей травы при $t_{bo} > t_k$

этом слое происходит охлаждение воздуха, что может привести к конденсации влаги (процесс $C-D$ на рис. 3.5), т.е. к увлажнению поверхности слоя сохнущего материала.

Предварительный искусственный подогрев вентиляционного воздуха на величину Δt принципиально не меняет направлений процессов тепло-массообмена в слое (при условии $t_{bo} > t_k$) (рис. 3.5). Биологические тепло-выделения и аккумулированная теплота ($Q_{ак} + Q_6$) отклоняют процесс от изоэнтальпы на величину, равноценную предварительному подогреву воздуха на Δt_{bo} . В то же время необходимо учесть, что при больших значениях Δt корректирующий слой может занимать весь объем штабеля или насыпи. В этом случае воздух не успевает охладиться до конечной температуры сырья ($t_{B1} > t_k$, $\varphi_{p1} < \varphi_p$), т.е. осушающая способность воздуха используется не полностью ($\Delta d_{B1} < \Delta d_B$), что нецелесообразно с экономической точки зрения. Кроме того, возможно выпадение конденсата в поверхностном слое

в соответствии с направлением луча B_1-D . Если же основной слой формируется, то процесс обработки воздуха будет идти по направлению $A-B-C$ и далее в поверхностном слое – по CD_1 или по CD_2 .

Неизотермичность процессов теплообмена в слое сохнувшей травы при работе САВ, и способность биологически активной продукции формировать необходимый для своей жизнедеятельности влажностный режим делает неприемлемой применение психрометрической теории влагообмена, согласно которой вся явная теплота, подводимая к продукту, расходуется на испарение влаги:

$$W = Q / r_o, \quad (3.2)$$

где $r_o = 2500 - 2,29t$ – скрытая теплота парообразования при атмосферном давлении, кДж/кг.

Количество потерь влаги в основном слое сохнувшей травы W в неизотермических условиях подчиняется обобщающей зависимости теплообмена в слое биологически активного сырья, полученной профессором В.З. Жаданом для насыпей картофеля и овощей [22], аналитически и экспериментально проверенной и примененной профессором В.И. Бодровым [11] для слоя сохнувшей травы:

$$W = Q / \varepsilon_t, \quad (3.3)$$

где ε_t – тепловлажностная характеристика процесса изменения состояния воздуха на $I-d$ -диаграмме в слое травы.

Показано [11], что для температурных условий сушки травы в теплый период года:

$$\varepsilon_t = 6385 - 147t \quad \text{при } 0 \leq t \leq 15 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (3.4)$$

$$\varepsilon_t = 6385 - 1,2t^3 - 335 \quad \text{при } -25 \leq t < 0 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (3.5)$$

$$\varepsilon_t = 6385 - 88t \quad \text{при } 15 \leq t \leq 35 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (3.6)$$

где t – средняя температура охлаждающего воздуха.

Представим уравнение (3.3) в виде:

$$W = Q / \varepsilon_t = \alpha_d F \varepsilon_u d (1 - \varphi_p) \tau = \text{const}. \quad (3.7)$$

Изменение величины любого члена в правой части уравнения приводит к компенсирующим процессам: например, возрастание коэффициента влагообмена α_d при увеличении скорости воздуха – к увеличению равновесной влажности φ_p . Уменьшение дефицита влажности $(1 - \varphi_p)$ наблюдается также при увеличении площади контакта травы и влажного воздуха F , влагосодержания d , коэффициента испарительной способности травы ε_u . Формула (3.7) учитывает основную особенность биологически активной продукции – формирование наиболее благоприятного для жизнедеятельности влажностного режима.

3.2. ПОСТРОЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ ВОЗДУХА НА I - d -ДИАГРАММЕ

С учетом описанных особенностей изменения теплофизических параметров вентиляционного воздуха была разработана теплофизическая модель тепломассопереноса в процессе сушки травы (рис. 3.6). Представленный графоаналитический метод оценки интенсивности влагообмена на основе I - d -диаграммы влажного воздуха позволяет определить конечную влажность материала в конкретных условиях сушки, в том числе в период дождей, а также выявить возможные зоны конденсации влаги в насыпи сохнущего материала при изменении режимов сушки и параметров атмосферного воздуха.

Рассмотрим последовательность построения основных процессов, характеризующих интенсивность сушки слоя травы, на I - d -диаграмме.

В точке I заданы параметры приточного воздуха $t_{\text{во}}$, $\varphi_{\text{во}}$, $d_{\text{во}}$, $I_{\text{во}}$. Если бы при сушке в слое происходил гипотетический процесс с постоянной температурой (процесс $1 - 2$), то количество поглощаемой воздухом влаги достигло бы максимальной величины $\Delta d_{\text{max}} = d_2 - d_1$. В реальных условиях из-за наличия на поверхности влажной травы несвязанной влаги ($\omega_{\text{тр}} < \omega_{\text{г}}$) при постоянной скорости сушки происходит процесс, близкий к адиабат-

ному. Воздух насыщается влагой практически до 100 %. Ассимилирующая способность воздуха при этом процессе равна $\Delta d_a = d_3 - d_1$ г/кг сух. в-ха. Адиабатность процесса нарушается наличием биологических тепловыделений (процесс 1–4), что равнозначно предварительному нагреву воздуха на $\Delta t_{во}$ (процесс 1–5). Результирующий процесс можно представить по лучу 5–4, влагопоглощающая способность воздуха увеличивается до величины $\Delta d_k = d_4 - d_1$ г/кг сух. в-ха.

Когда влажность травы переходит гигроскопическую границу и имеет место углубление зоны испарения ($\omega_{тр} < \omega_r$) на поверхности травы, равновесная относительная влажность становится ниже 100 %. Конкретные значения равновесной влажности φ_p определяются по изотермам десорбции, аналогичным приведенным на рис. 1.2. Влагопоглощающая способность воздуха в корректирующем слое уменьшается до $\Delta d_p = d_6 - d_1$, определяемой по значению φ_{p1} (процесс 1–6).

Предварительный нагрев воздуха на Δt (процесс 1–7) приводит к возрастанию его влагопоглощающей способности до $\Delta d_{кг} = d_9 - d_1$, если трава влажная (процесс 7–9), или до $\Delta d_{рг} = d_{10} - d_1$ при ее влажности ниже гигроскопической (процесс 7–10). Процесс 7–11 показывает перегрев воздуха за счет биологических тепловыделений.

В основном слое из-за биологических тепловыделений q_v травы продолжается ассимиляция влаги воздухом, процесс соответствует линии $\varphi_p \approx \varphi = 100\%$ (процесс 4–12). Количество поглощенной влаги $\Delta d_{ос} = d_{12} - d_4$.

При кратковременных дождях температура и относительная влажность наружного воздуха изменяются в первом приближении по адиабате (луч 1–3) до $\varphi_n \approx \varphi_p = 100\%$. В период затяжных дождей относительная влажность наружного воздуха $\varphi_n = 100\%$, температура его зависит от конкретных погодных условий. Приняв для анализа в период дождей параметры воздуха, соответствующие точке 3, покажем условия, при которых возможно предотвращение увлажнения сохнувшей травы, сена средой с такими

параметрами.

Когда часть травы уже подсушена, нагрев воздуха до температуры, соответствующей φ_{p1} (процесс 3-14), не дает положительного эффекта, т.к. при нагреве наружного воздуха на $\Delta t_d < (t_{14} - t_3)$ контакт его с травой сопровождается увлажнением последней. Только перегрев воздуха выше температуры t_{14} делает его сушильным агентом.

Для подогрева воздуха в период дождей требуется общее количество теплоты:

$$Q_d = (I_{15} - I_3)L_B/\rho_B, \quad (3.8)$$

из нее полезно используемая на сушку часть теплоты составляет:

$$Q_{дп} = (I_{15} - I_{14})L_B/\rho_B. \quad (3.9)$$

В формулах (3.8) и (3.9) учитывается только количество теплоты на подогрев наружного воздуха до точки 15. Биологическая теплота выделяется в слое травы постоянно.

Теоретически минимальный расход воздуха для ассимиляции водяных паров из влажной травы в процессе испарения при постоянной скорости сушки $G_{в.сг}$, кг, равен:

$$G_{в.сг} = \frac{10^3 G_{тр} (\omega_{тр} - \omega_r)}{(100 - \omega_r) \Delta d_k} = \frac{10^3 G_c (\omega_{тр} - \omega_r)}{(100 - \omega_{тр}) \Delta d_k}, \quad (3.10)$$

в гигроскопической области

$$G_{в.г} = \frac{10^3 G_{тр} (\omega_{тр} - \omega_k)}{(100 - \omega_k) \Delta d_p} = \frac{10^3 G_c (\omega_{тр} - \omega_k)}{(100 - \omega_{тр}) \Delta d_p}, \quad (3.11)$$

где $G_{тр}$ и G_c – соответственно первоначальная масса травы и масса заготовленного сена, кг;

Δd_k и Δd_p – влагопоглощающие способности воздуха соответственно в области сушки травы и в области гигроскопической влажности, г/кг сух. в-ва;

$\omega_{тр}$, ω_r , ω_k – соответственно первоначальная, гигроскопическая и кондиционная влажность травы и сена, %.

С учетом непрерывности процесса влагосъема во всем объеме свеже-

скошенной травяной массы в последней формуле следует принимать при переходе сушки из области выше гигроскопической в гигроскопическую $\omega_{\text{тр}} = \omega_{\text{г}}$. Масса влаги, удаляемой из травы в гигроскопической области сушки, не превышает 25 % от общей. Относительно небольшое количество испаряющейся воды позволяет при расчетах уменьшение скорости влаго-съемы в гигроскопической области сушки считать постоянным.

Минимальное время для получения сена кондиционной влажности τ при непрерывной работе САВ производительностью $L_{\text{в}}$ складывается из продолжительности периода сушки влажной травы τ_1 и периода досушки в гигроскопической области τ_2 :

$$\tau = \tau_1 + \tau_2; \quad (3.12)$$

$$\tau_1 = G_{\text{всг}}/L_{\text{в}}\rho_{\text{в}}; \quad \tau_2 = G_{\text{вг}}/L_{\text{в}}\rho_{\text{в}}, \quad (3.13)$$

где $L_{\text{в}}$ – производительность вентиляторов, м³/ч;

$\rho_{\text{в}}$ – плотность воздуха, кг/м³.

Из-за несовершенства систем воздухоподдачи в насыпь сохнущей травы не полностью используется потенциал воздуха по поглощению влаги. Поэтому расчетный расход воздуха систем активной вентиляции ($L_{\text{САВ}}$) необходимо увеличить по отношению к необходимому теоретически минимальному: $L_{\text{САВ}} = AL_{\text{в}}$.

Значения опытного коэффициента A зависят от способа воздухоподдачи. Даже при решетчатых полах с подпольными каналами в сенохранилищах с негерметичными стенами невозможно добиться равномерной фильтрации воздуха, поэтому величина A не бывает ниже 1,20...1,25. При наличии в хранилище линейно протяженных напольных воздухораспределителей $A = 1,8...2,0$. При сушке отдельно стоящей скирды высотой 5,0 м, сформированной в один прием с оптимальными для равномерной поддачи воздуха геометрическими размерами, расход воздуха в два раза больше, чем при равномерном профиле скоростей в массе травы ($A = 2,0$), а при полойной сушке еще меньшее количество воздуха участвует в удалении вла-

ги: $A > 2,0$ ($A \approx 2,5$).

Равномерность воздушного потока в слое сохнувшей травы повышается при отсасывании воздуха через воздухораспределители, поэтому рекомендуемое нами значение $A \approx 1,20 \dots 1,25$ сохраняется для этого случая (по аналогии с равномерным напольным распределением воздуха в сенохранилищах).

С учетом расчетов по фильтрации воздуха через штабель тюков прессованного сена [37] нами получена зависимость коэффициента A в зависимости от способа воздухоподдачи при различных плотностях сена в тюках $\rho_{\text{тр}}$ (рис. 3.7).

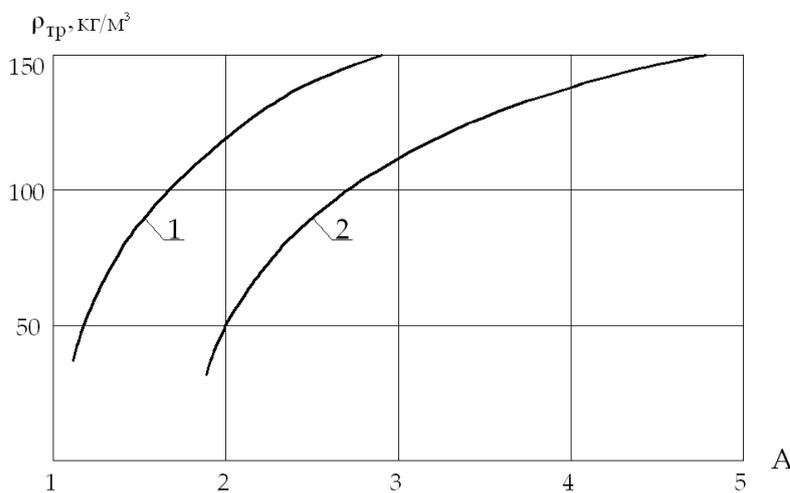


Рис. 3.7. Значение коэффициента A для штабеля прессованного сена: 1 – при равномерной воздухоподдаче в сенохранилище; 2 – для отдельно стоящего штабеля

Максимально возможное значение влагосодержания при постоянных значениях температуры $t_{\text{во}}$ в слое травы $\Delta d_{\text{max}} = 14,7 - 7,9 = 6,8$ г/кг сух. в-ха. Если бы процесс сушки проходил до насыщения воздуха ($\phi = 100\%$) по линии постоянной энтальпии $I_{\text{во}}$, то $\Delta d_a = d_3 - d_1 = 10,3 - 7,9 = 2,4$ г/кг сух. в-ха. Практически воздух насыщается до равновесной влажности $\phi_{\text{р1}} = 75\%$ и поглощает всего $\Delta d_p = d_6 - d_1 = 9,2 - 7,9 = 1,3$ г/кг сух. в-ха.

Пример 3.2. Требуется определить степень подогрева воздуха, которая необходима для повышения его влагопоглощающей способности, рассчитанной в примере 6.1, с 1,3 до 2,5 г/кг сух. в-ха. Находим положение точки 10 на пересечении кривой $\phi_{\text{р1}} = 75\%$ и линии $d_{\text{рг}} = d_1 + 2,5$. Затем из точки 10 по линии $I = \text{const}$ с учетом подогрева за счет биологической теплоты поднимаемся до пересечения с линией $d_1 = \text{const}$ в точке 7, которая и дает значение температуры подогретого воздуха $t_7 = 24,5$ °С, перегрев составляет $\Delta t = 24,5 - 20 = 4,5$ °С. Процесс сушки идет по лучу 7 – 10. Зная величины Δd_p или $\Delta d_{\text{рг}}$, можно рассчитать по формулам 3.10...3.13 теоретически минимальные расходы воздуха и продолжительность процесса сушки.

Пример 3.1. Определить влагопоглощающую способность атмосферного воздуха. Начальные параметры травы: влажность $w_{\text{тр}} = 31\%$, температура $t_{\text{тр}} = 15$ °С. По кривым десорбции, приведенным на рис. 1.2, этим параметрам травы соответствует равновесная влажность воздуха $\phi_{\text{р1}} = 75\%$ (точка б), влагосодержание воздуха в точке б составляет $d_6 = 9,2$ г/кг сух. в-ха. Параметры атмосферного воздуха $t_{\text{во}} = 20$ °С, $\phi_{\text{во}} = 54\%$, $d_{\text{во}} = 7,9$; тогда $d_2 = 14,7$ г/кг сух. в-ха.

Пример 3.3. Исходная влажность травы, уложенной в сенохранилище с решетчатым полом и подпольными каналами для досушки, $w_{\text{тр}} = 31\%$, масса $G_{\text{тр}} = 40$ т, конечная кондиционная влажность сена должна составлять $w_c = 17\%$. Определить теоретически минимальный расход неподогретого атмосферного воздуха и минимальное время сушки травы при непрерывном вентилировании и параметрах наружного воздуха, как в примере 3.1.

Количество удаляемой из травы воды составляет $G_{\text{вл}} = 40\,000(31 - 17)/(100 - 17) = 6747$ кг. Масса влаги, поглощаемая 1 кг воздуха, составляет $\Delta d_p = 1,3$ г. Сквозь высушиваемую траву необходимо продуть воздух в количестве $G_{\text{возд}} = G_{\text{вл}} 1000/\Delta d_p = 6747 \cdot 1000/1,3 = 5\,190\,000$ кг. Плотность воздуха при $t_{\text{во}} = 20$ °С равна $\rho_v = 1,2$ кг/м³. Объем продуваемого воздуха $L_{\text{возд}} = G_{\text{возд}}/\rho_v = 5\,190\,000/1,2 = 4\,325\,000$ м³. Производительность вентилятора установки активной вентиляции $L_v = 50\,000$ м³/ч (удельный расход воздуха $L_m = 1250$ м³/(т·ч)). Время непрерывной работы САВ составляет $\tau = L_{\text{возд}}/L_v = 4\,325\,000/50\,000 = 86,5$ ч или 3,6 сут. Наиболее благоприятные климатические условия имеют место с 9 до 18 ч, т.е. 9 ч/сут. При таких режимах сушки сено будет иметь кондиционную влажность через $86,5/9 = 9,6$ сут. С учетом неравномерности воздухо-распределения ($A = 1,2$) процесс сушки удлинится до $9,6 \cdot 1,2 = 11,5$ сут.

Пример 3.4. Для условия примера 3.3 определить продолжительность работы САВ при подогреве воздуха на 4,5 °С (см. пример 3.2). Влагопоглощающая способность воздуха $\Delta d_{\text{пр}} = 2,5$ г/кг сух. в-ха, $G_{\text{возд}} = G_{\text{вл}} 1000/\Delta d_{\text{пр}} = 6\,747 \cdot 1000/2,5 = 2\,700\,000$ кг, $L_{\text{возд}} = 2\,700\,000/1,2 = 2\,250\,000$ м³. При $L_v = 50\,000$ м³/ч время непрерывного вентилирования составляет $\tau = 2\,250\,000/50\,000 = 45$ ч, а с учетом неравномерности воздухо-раздачи увеличивается до $45 \cdot 1,2 = 54$ ч. В течение девятичасовой ежесуточной продувки трава будет высушена за $54/9 = 6$ циклов.

Пример 3.5. Для климатических условий примера 3.1 определить степень перегрева воздуха во время дождя, чтобы его влагопоглощающая способность составляла $\Delta d_{\text{др}} = 1,5$ г/кг сух. в-ха. Параметры точки 1: $t_{\text{во}} = 20$ °С, $\phi_{\text{во}} = 54\%$, $d_{\text{во}} = 7,9$; точки 3: $t_3 = 14,2$ °С, $\phi_3 = 100\%$, $d_3 = 10,3$, $I_3 = 40$ кДж/кг. Чтобы определить на диаграмме положение точки 15, лежащей на линии $d_3 = 10,3$, необходимо сначала найти положение точки 18. Эта точка находится на пересечении линии $d_{18} = d_3 + \Delta d_{19} = 10,3 + 1,5 = 11,8$ с кривой $\phi_{\text{р1}} = 75\%$. Параметры точки 18: $t_{18} = 21,2$ °С, $\phi_{18} = 75\%$, $d_{18} = 11,8$, $I_{18} = 51,3$. Точка 15 лежит на пересечении изоэнтальпы $I_{17} = I_{19}$ с учетом биологического самосогревания и линии постоянного влагосодержания d_3 . Параметры точки 15: $t_{15} = 25,2$ °С, $\phi_{15} = 51\%$, $d_{15} = 10,3$. Для определения эффективности работы систем подогрева воздуха необходимо также знать параметры точки 14, лежащей на пересечении $\phi_{\text{р1}} = 75\%$ с $d_3 = d_{15} = 10,3$; $t_{14} = 18,7$ °С, $\phi_{14} = \phi_{\text{р1}} = 75\%$, $I_{14} = 44,9$ кДж/кг.

Если производительность САВ составляет $L_{\text{САВ}} = L_{\text{в}} A = 50\,000 \cdot 1,2 = 60\,000$ м³/ч ($G_{\text{САВ}} = 60\,000 \cdot 1,2 = 72\,000$ кг/ч), то общее количество теплоты для нагрева воздуха от точки 3 до точки 15 по (3.9) равно $Q_{\text{об}} = G_{\text{САВ}} (I_{15} - I_3) = 72\,000 (51,3 - 40) = 824\,600$ кДж/ч. Из общего количества теплоты полезно используется для испарения влаги по (3.8) $Q_{\text{пол}} = G_{\text{САВ}} (I_{15} - I_{14}) = 72\,000 (51,3 - 44,9) = 460\,800$ кДж/ч или 56,7 %. Для достижения равновесной влажности воздуха и сена в период дождя воздух необходимо подогреть на 4,5 °С, повысив его энтальпию на 4,0 кДж/кг, потратив на это $Q_p = G_{\text{САВ}} (I_{14} - I_3) = 72\,000 (44,9 - 40) = 352\,800$ кДж/ч или 43,3 % общей энергии. Только при этом условии подаваемый в слой воздух (сушильный агент) не будет увлажнять продукцию во время дождя.

Пример 3.6. Во время дождя подаваемый в траву воздух искусственно подогревается на $\Delta t = 15$ °С. Остальные условия аналогичны примеру 3.5. Найти влагопоглощающую способность воздуха.

Параметры точки 15: $t_{15} = t_3 + \Delta t = 14,2 + 15 = 29,2$ °С; $d_{15} = 10,3$; $I_{15} = 55,3$ кДж/кг. Через точку 15 по линии $I = \text{const}$ с учетом биологического нагрева проводим линию до пересечения с равновесной влажностью $\varphi_{p1} = 75$ % (точка 18); $t_{18} = 22,6$ °С, $d_{18} = 12,8$; $I_{18} = 55,3$ кДж/кг. Искомая величина $\Delta d_{\text{др}} = d_{18} - d_{15} = 12,8 - 10,3 = 2,5$ г/кг сух. в-ха.

Пример 3.7. Определить, при каких условиях возможна сушка травы неподогретым воздухом в период дождей при условиях примера 3.5. Сушка будет происходить, если подогрев воздуха в вентиляторе $\Delta t_{\text{вент}}$ и подогрев воздуха за счет самосогревания сена Δt_c (находится непосредственным замером температуры в слое) превышает величину $(t_{14} - t_3)$, принимаемую по I - d -диаграмме, то есть $(\Delta t_{\text{вент}} + \Delta t_c) > (t_{14} - t_3)$. Для случая примера 3.5 $(\Delta t_{\text{вент}} + \Delta t_c) > 18,7 - 14,2 = 4,5$ °С. Величина $\Delta t_{\text{вент}}$ для центробежных вентиляторов равна 0,8...1,0 °С, а для осевых вентиляторов – в пределах 0,4...0,5 °С.

3.3. ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ I - d - θ -ДИАГРАММЫ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА

Теория интенсивности тепломассопереноса, основанная на понятии потенциала влажности [6, 10], позволяет описать физические явления с помощью одного обобщающего показателя без анализа микроявлений и частных закономерностей при сушке травы на основе уравнения состояния влажного материала как открытой гетерогенной системы в условиях изотермических, так и при неизотермических условиях. Потенциал влажности позволяет учесть действия различных силовых факторов на влагу, находящуюся как в жидком, так и в парообразном состоянии. Термодинамические функции состояния отдельного компонента или фазы (внутренняя энергия, энтальпия, свободная энергия и т.д.) можно выразить с помощью трех независимых переменных: массы m , объема V и температуры T . Тогда изменение свободной энергии для влаги в жидком состоянии можно записать в виде:

$$dF_{\text{ж}} = -s_{\text{ж}}dT + \left(-\frac{p_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}}} + \mu_{\text{ж}} + \sum \mu_{\text{ж}j} + \theta_{\Gamma} \right) dm_{\text{ж}}, \quad (3.14)$$

где $s = \partial F / \partial T$ – энтропия; $p = \partial F / \partial V$ – давление; $\mu = \partial F / \partial m$ – химический потенциал фазы.

Зависимость (3.14) представляет собой основное термодинамическое

уравнение Гиббса для открытой гетерогенной системы, преобразованное с учетом наличия в фазе жидкой влаги растворенных примесей и влияния гравитационного поля. Выражение в скобках по физическому смыслу является полным термодинамическим потенциалом θ (потенциалом влажности), за счет которого происходит перенос вещества фазы:

$$\theta = -\frac{p_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}}} + \mu_{\text{ж}} + \sum \mu_{\text{ж}j} + \theta_{\Gamma}. \quad (3.15)$$

Величина потенциала влажности θ зависит от давления $p_{\text{ж}}$, химического потенциала $\mu_{\text{ж}}$, потенциала растворенных веществ $\mu_{\text{ж}j}$, измерить которые непосредственно в опыте нельзя. Для построения численной шкалы θ принято равновесное влагосодержание фильтровальной бумаги при температуре $t = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 3.8).

По аналогии с другими физическими явлениями переноса, поток влаги с поверхности влажного материала пропорционален градиенту потенциала влажности:

$$j_{\theta} = \alpha_{\theta}(\theta_{\text{пов}} - \theta_{\text{в}}), \quad (3.16)$$

где $\theta_{\text{пов}}$ – потенциал влажности на поверхности материала, $^{\circ}\text{В}$;

$\theta_{\text{в}}$ – потенциал влажности окружающего воздуха, $^{\circ}\text{В}$;

α_{θ} – коэффициент влагопереноса, $\text{г}/(\text{кг}\cdot\text{ч}^{\circ}\text{В})$.

Для расчета значений потенциала влажности наружного воздуха в различных диапазонах температуры на основе опытных данных получены следующие зависимости [7]:

$$\theta_{\text{в}} = -4,01 + 0,488t_{\text{в}} + 0,169\varphi_{\text{в}} \quad (0 \text{ }^{\circ}\text{C} < t_{\text{в}} \leq 10 \text{ }^{\circ}\text{C}); \quad (3.17)$$

$$\theta_{\text{в}} = -13,6 + 1,22t_{\text{в}} + 0,204\varphi_{\text{в}} \quad (10 \text{ }^{\circ}\text{C} < t_{\text{в}} \leq 20 \text{ }^{\circ}\text{C}). \quad (3.18)$$

Каждому значению потенциала влажности θ соответствует бесконечное множество сочетаний значений температуры $t_{\text{в}}$ и относительной влажности $\varphi_{\text{в}}$. Используя известные соотношения параметров влажного воздуха и шкалу потенциала влажности, в [8] экспериментально построена зависимость между потенциалом влажности и упругостью водяного пара в

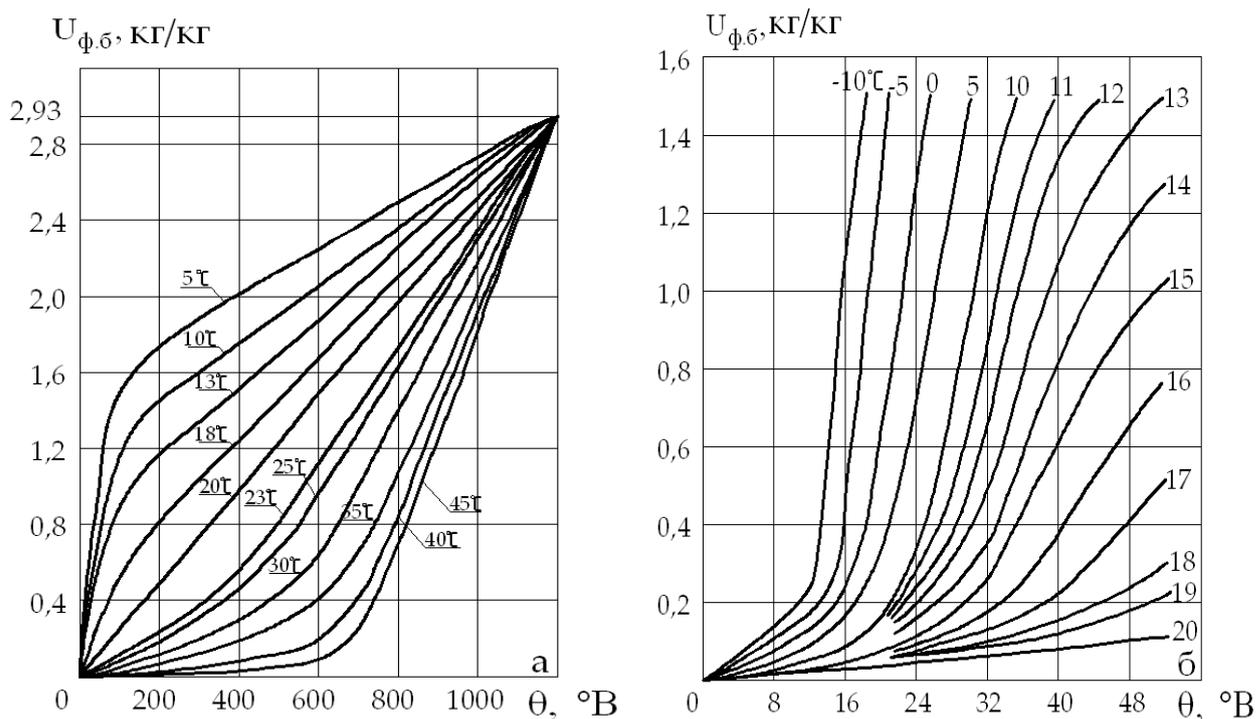


Рис. 3.8. Шкала потенциала влажности: *a* – при различных температурах; *б* – в диапазоне 0...50 °С, включая область отрицательных температур

воздухе при различных температурах и нанесены линии постоянных потенциалов влажности на $I-d$ -диаграмму влажного воздуха (рис. 3.9).

Примечание. При построении показанной на рис.3.9 $I-d-θ$ -диаграммы вместо обозначения относительной влажности воздуха буквой $φ$ принято обозначение буквой $ω$, вместо обозначения величины потенциала влажности буквой $θ$ принята буква $υ$.

Линии $θ = \text{const}$ на $I-d-θ$ -диаграмме представляет собой группу параллельных кривых. При $φ_v < 80\%$ линии потенциала влажности являются прямыми во всем диапазоне температур и параллельны линиям $d = \text{const}$. В области высоких значений относительной влажности воздуха ($φ_v > 80\%$) линии $θ = \text{const}$ имеют значительные отклонения в сторону уменьшения значений влагосодержания влажного воздуха.

Использование $I-d-θ$ -диаграммы для инженерного расчета процесса сушки позволяет графически определить значения потенциала влажности $θ$ воздуха в слое растительного сырья и применить зависимость (3.16) для определения величины влагопотока.

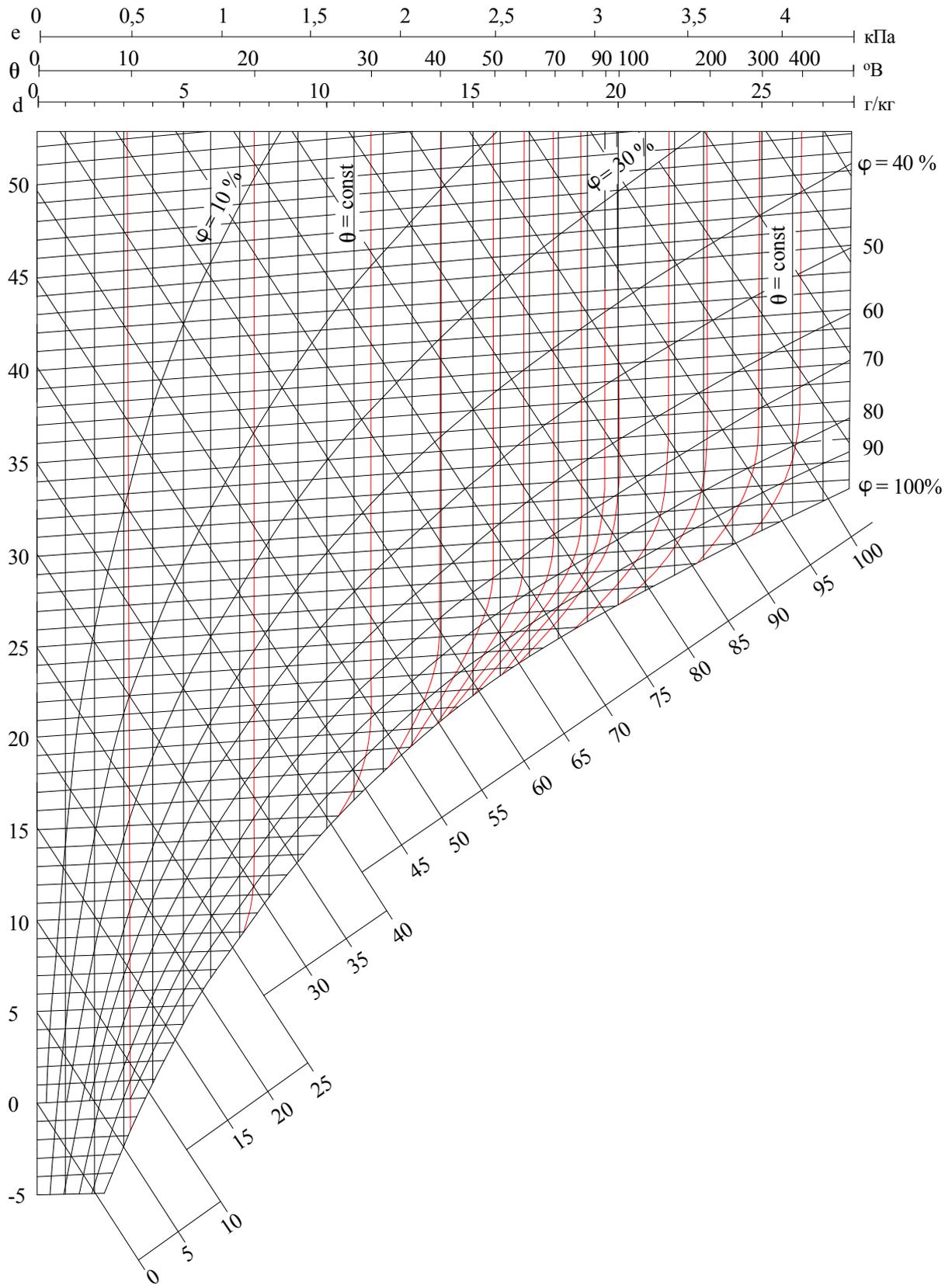


Рис. 3.9. I-d-θ-диаграмма (см. примечание в тексте)

На $I-d$ -диаграмме влажного воздуха нет кривых линий, кроме $\varphi = \text{const}$. На $I-d-\theta$ -диаграмме два вида кривых линий: $\varphi = \text{const}$, $\theta = \text{const}$. Построение линий $\varphi = \text{const}$ основано на аналитическом расчете значений относительной влажности воздуха при различных значениях температуры и влагосодержания воздуха. Построение графических зависимостей θ , предложенных авторами [8], не объяснено с термодинамической позиции и не имеет математической обработки.

Для термодинамического обоснования характера направления кривых $\theta = \text{const}$ на диаграмме нами были проведены следующие аналитические исследования. Воспользовавшись уравнением Клапейрона, относительная влажность воздуха была выражена отношением парциальных давлений водяного пара:

$$\varphi = \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{пн}}} \cdot 100\%. \quad (3.19)$$

Давление насыщенного водяного пара $p_{\text{пн}}$ зависит только от температуры воздуха. Его значения определены экспериментальным путем и приведены, например, в [33].

Используя соотношение для парциального давления пара

$$p_{\text{п}} = \frac{p_{\text{б}} d}{623 + d}, \quad (3.20)$$

относительная влажность воздуха через его влагосодержание выражается следующим образом:

$$\varphi = \frac{p_{\text{б}} \cdot d}{(623 + d) p_{\text{пн}}} 100\%. \quad (3.21)$$

По выражению (3.21) построена зависимость между температурой t и относительной влажностью воздуха φ при некоторых значениях влагосодержания d (рис. 3.10). Характер полученных кривых говорит о том, что с понижением температуры при $d = \text{const}$ величина относительной влажности воздуха экспоненциально возрастает, т.е. оказывает большее влияние на значение потенциала влажности, чем изменение температуры, что ка-

чественно подтверждается математическим видом зависимостей (3.17 и 3.18). Именно следствием этого, по нашему мнению, является возникновение кривизны линий $\theta = \text{const}$ в сторону уменьшения влагосодержания в области высоких значений относительной влажности ($\varphi > 80\%$), где взаимосвязь величин t и φ особенно выражена. При $t > 30\text{ }^\circ\text{C}$ зависимость относительной влажности воздуха от его влагосодержания можно представить линейной, вследствие чего значения величины потенциала влажности θ качественно совпадают с прямой $d = \text{const}$. Это подтверждается отсутствием процесса массопереноса при постоянном влагосодержании и косвенно объясняет геометрический вид линий $\theta = \text{const}$.

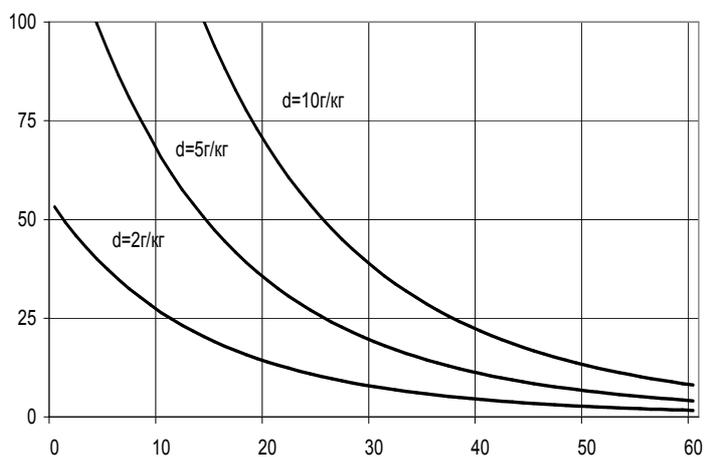


Рис. 3.10. Зависимость между температурой и относительной влажностью воздуха

Для расчета интенсивности и направления влагопереноса между поверхностью травы и продуваемым воздухом с использованием $I-d-\theta$ -диаграммы влажного воздуха необходимо иметь изотермы сорбции-десорбции травы в координатах $\omega_{\text{тр}}-\theta$, по аналогии с такими же изотермами, построенными в координатах $\omega_{\text{тр}}-\varphi_{\text{в}}$. Такие изотермы построены по экспериментальным данным (рис.3.11 и 3.12). Заштрихованная часть на каждом графике показывает значения кондиционной влажности хранящегося злакового и бобового сена.

3.4. ОБЕСПЕЧЕННОСТЬ ПАРАМЕТРОВ НАРУЖНОГО КЛИМАТА

Качество заготавливаемого сена напрямую зависит от параметров сушильного агента. Как отмечалось ранее, из всех существующих способов сушки растительного сырья наиболее эффективным считается искусствен-

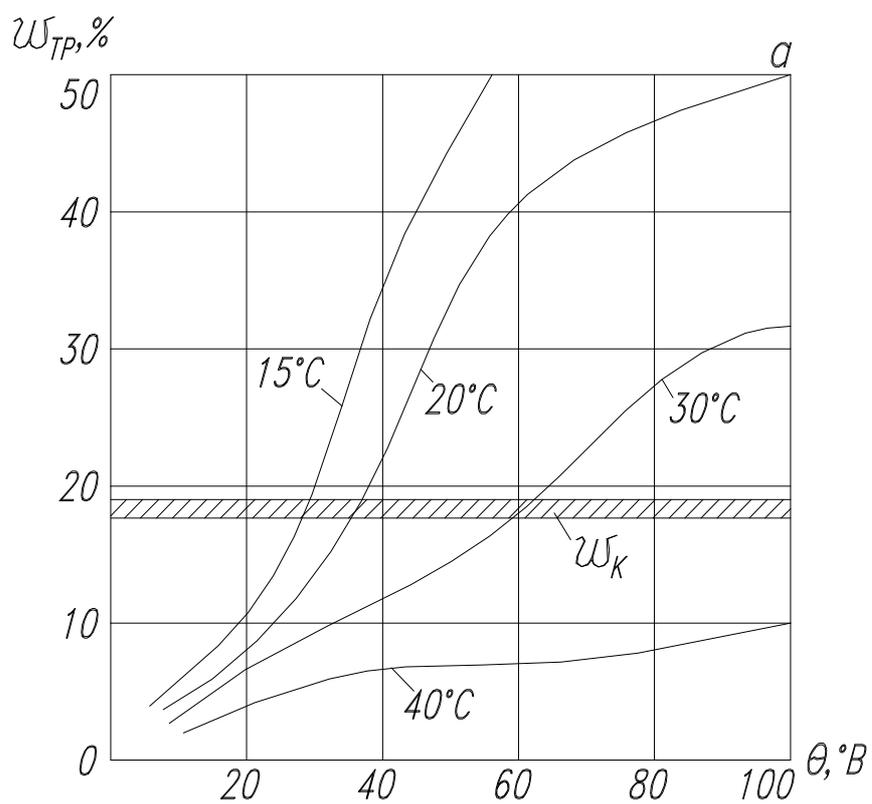


Рис. 3.11. Кривые десорбции злаковых трав

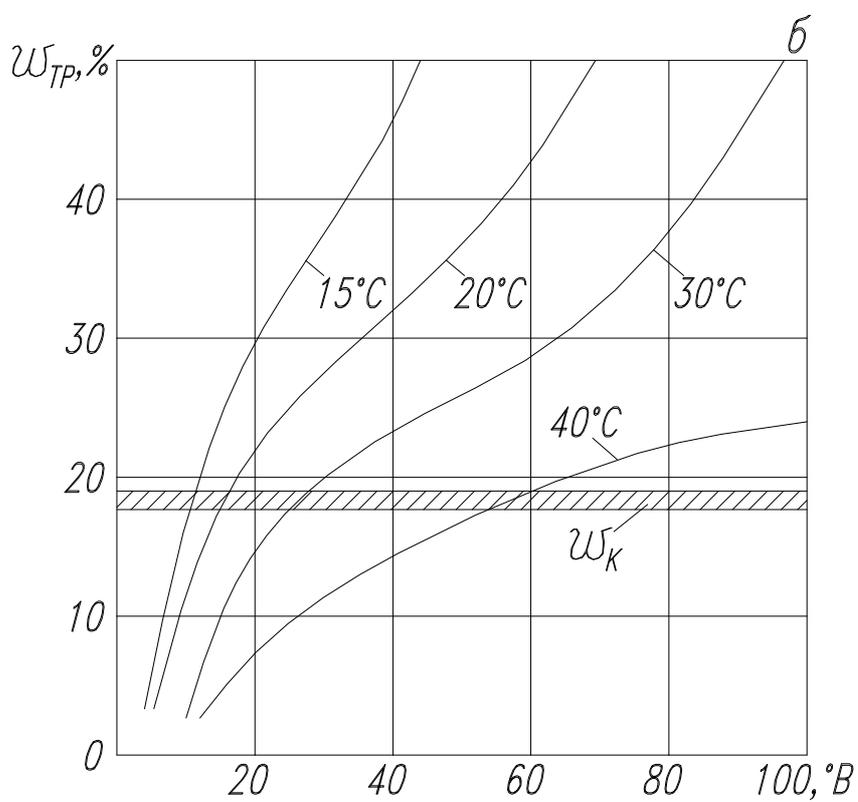


Рис.3.12. Кривые десорбции бобовых трав (люцерны)

ная сушка методом активного вентилирования, при этом наименее энерго-емка продувка неподогретым атмосферным воздухом. Однако применение наружного воздуха в качестве агента сушки ограничивается климатическими условиями большинства районов страны, несмотря на то, что в период заготовки кормов (июнь-август) наблюдаются максимальные значения температуры t_n и минимальные значения относительной влажности воздуха φ_n .

В качестве показателя оценки возможной естественной теплоты используется коэффициент обеспеченности параметров наружного климата для сушки $K_{об}$, величина которого показывает долю общего числа случаев, не допускающих отклонения от расчетных условий [6]:

$$K_{об} = (N - n) / N, \quad (3.22)$$

где N – общее число случаев;

n – число случаев отклонения условий от расчетных.

Обеспеченность появления двух зависимых параметров $K_{об}(t_n, \varphi_n)$, т.е. появления одновременно заданной температуры и заданной относительной влажности равна:

$$K_{об}(t_n, \varphi_n) = K_{об}(t_n) \cdot K_{об}(\varphi_n / t_n), \quad (3.23)$$

где $K_{об}(t_n)$ – обеспеченность появления заданной температуры наружного воздуха;

$K_{об}(\varphi_n / t_n)$ – условная обеспеченность появления относительной влажности φ_n при заданной температуре t_n .

При обработке климатических данных расчетное изменение температуры наружного воздуха должно соответствовать заданному коэффициенту обеспеченности $K_{об}(t_n) = K_{об}(t_n, \varphi_n)$, а расчетное значение относительной влажности принимается исходя из наиболее невыгодного сочетания параметров (наибольшие значения φ_n при различных t_n), т.е. сочетания, отвечающего условию $K_{об}(\varphi_n / t_n) = 1$.

Анализ динамики тепломассообменных процессов при сушке биологически активного сырья показал, что для получения высококачественного

сена при сушке неподогретым воздухом минимальные значения температуры наружного воздуха должны быть не ниже 16,5...17,0 °С, а относительной влажности – 75 % [11].

Проведена оценка обеспеченности параметров наружного климата для сушки растительного сырья в условиях Нижегородской и Самарской областей, климат которых характерен для большинства регионов Поволжья. Значения $K_{об}$ в период заготовки грубых кормов определялись по результатам статистической обработки метеорологических данных за последние 10 лет. Величины $K_{об}$ рассчитывались по среднемесячным значениям относительной влажности и температуры за три летних месяца путем построения статистического ряда. Среднемесячная температура воздуха в летние месяцы выше 20 °С наблюдалась в 43 % случаев, $\varphi_n < 70$ % регистрировалась в 83 % случаев. Параметры атмосферного воздуха в обозначенный период при $K_{об} = 0,85$ составляют $t_n > 18$ °С и $\varphi_n < 70$ %.

Аналогичный расчет по среднесуточным значениям рассматриваемых явлений показал: обеспеченность минимальных допустимых значений параметров воздуха составляет 0,93 для температуры и 0,98 для относительной влажности; среднемесячные значения t_n и φ_n составляют при $K_{об} = 0,9$ соответственно 20 °С и 50 %.

Однако такой расчет является приближенным и может быть применен только для предварительного анализа климатических условий. Для более точного рассмотрения вопроса предлагается определять значения $K_{об}$ по среднемесячному ходу температур, который дает не только наглядное представление о динамике температур в течение лета, но и позволяет оценить возможность сушки за любой временной промежуток (от 1 дня до 3 мес.) [27].

Учитывая тот факт, что вентилирование растительного сырья осуществляют в течение 8...10 часов в сутки, часто возникает необходимость расчета $K_{об}$ для определенного периода суток. Поэтому особое значение при оценке возможности сушки травы атмосферным воздухом имеет су-

точное изменение температуры (рис. 3.13) и амплитуда среднесуточного колебания температуры наружного воздуха.

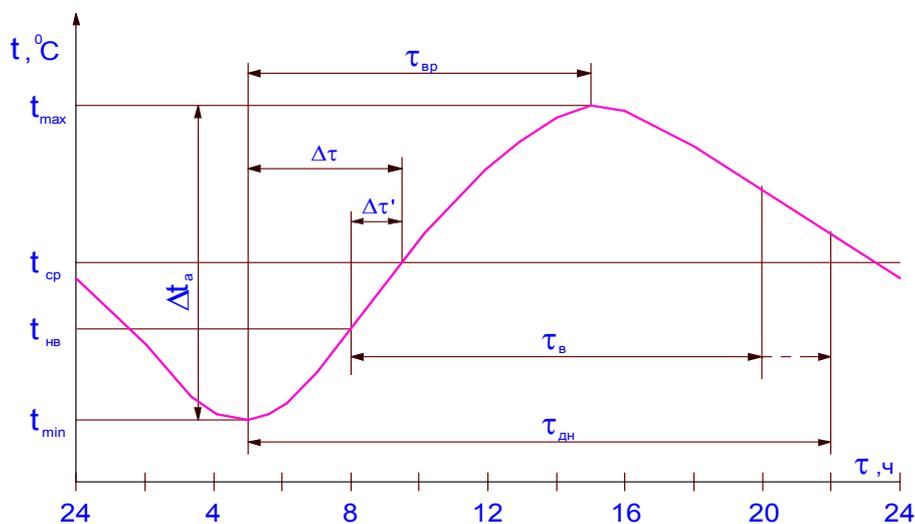


Рис. 3.13. Изменение суточной температуры наружного воздуха в июне-августе

Наиболее благоприятные условия для сушки растительного сырья неподогретым воздухом складываются в течение дня в интервале с 10 до 20 ч; (минимальное значение $K_{об} = 0,9$). Приведенные данные позволяют сделать вывод о возможности использования атмосферного воздуха в качестве сушильного агента на территориях Нижегородской и Самарской областей без предварительной его обработки с минимальным коэффициентом обеспеченности $K_{об} = 0,9$ не менее 10 часов в сутки.

Учитывая высокую интенсивность солнечного излучения в летние месяцы, можно говорить о целесообразности использования гелиоустановок для дополнительного подогрева продувочного воздуха на $5...10\text{ }^{\circ}\text{C}$ с целью экономии энергоресурсов и интенсификации процесса сушки биологически активного сырья. Обеспеченность минимально допустимых параметров воздуха в этом случае составит $K_{об} = 0,99$ на весь период послеуборочной обработки растительной продукции.

На практике процесс вентилирования часто начинается раньше, чем температура атмосферного воздуха достигает среднесуточного значения.

Если при этом среднесуточная температура $t_{\text{ср}}$ равна минимально допустимой по технологии $t_{\text{min}}^{\text{доп}}$, то в течение промежутка времени $\Delta\tau'$ для нормального ведения процесса сушки требуется дополнительный подогрев агента сушки. Поэтому определение коэффициента обеспеченности по среднесуточной температуре воздуха может привести к завышенным значениям $K_{\text{об}}$. Во избежание таких ошибок разработана методика проведения оценки этой величины по температуре воздуха в начале вентилирования $t_{\text{н.в}}$, которая сходна величине при оценке эффективности естественного холода.

Если процесс вентилирования осуществляется до захода солнца, величина начальной температуры вентиляционного воздуха $t_{\text{н.в}}$, °С, составляет [27]:

$$t_{\text{н.в}} = t_{\text{ср}} - \frac{0,5\Delta t_a (\Delta\tau - \tau_{\text{дн}} + \tau_{\text{в}})}{\Delta\tau}, \quad (3.34)$$

где Δt_a – амплитуда среднесуточного колебания температуры наружного воздуха для расчетного месяца, °С;

$\tau_{\text{дн}}$ – продолжительность дня (время от восхода до захода солнца), ч;

$\tau_{\text{в}}$ – продолжительность вентилирования, ч;

$\Delta\tau$ – время от восхода солнца до точки совпадения температурной кривой со средней температурой наружного воздуха, ч, (рис. 3.19).

Если продувка заканчивается раньше захода солнца, то начальная температура вентилирования будет равна:

$$t_{\text{н.в}} = t_{\text{ср}} - \frac{\Delta t_a \cdot \Delta\tau'}{\tau_{\text{вр}}}, \quad (3.35)$$

где $\Delta\tau'$ – время от начала вентилирования слоя сохнувшей травы до точки совпадения температурной кривой со средней температурой наружного воздуха, ч, (рис. 3.19);

$\tau_{\text{вр}}$ – продолжительность возрастания температуры наружного вентиляционного воздуха (время от восхода солнца до достижения максимальной температуры), ч.

Глава 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СУШКИ ТРАВЫ

Приведенные в главе 3 теоретические основы расчетов теплофизических процессов тепломассообмена в период сушки травы требуют знания конкретных значений коэффициентов обмена теплотой и влагой. Получение этих величин возможно только в процессе проведения специальных лабораторных, полупромышленных и натуральных исследований. Предпочтение следует отдавать натурным исследованиям. В некоторых случаях только они точно характеризуют теплофизические процессы в биологически активных средах. Однако такие исследования чрезвычайно трудоемки, длительны, в них не всегда возможно имитировать необходимые начальные и граничные условия для получения искомых величин. Часть экспериментальных исследований нами проведено в лабораторных условиях. Основное требование к этим экспериментам состояло в наиболее точном воспроизводстве на лабораторном стенде реальных условий процессов тепломассообмена при продувке воздухом слоя сохнувшей травы.

4.1. ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССОВ СУШКИ

Для выявления закономерностей процессов сушки травы и определения количественных характеристик тепломассообмена в слое влажной травы на кафедре отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха Нижегородского государственного архитектурно-строительного университета был разработан и смонтирован экспериментальный стенд (рис. 4.1). Комплексные исследования на стенде проводились авторами в течение трех лет, хотя начало исследований по сушке травы на кафедре было начато около двадцати пяти лет назад совместно с инженером И.А. Фетисовым.

Основным рабочим инструментом стенда является разрезная колонка. Методика определения влажностных характеристик материалов с помощью разрезных колонок разработана на кафедре отопления и вентиля-

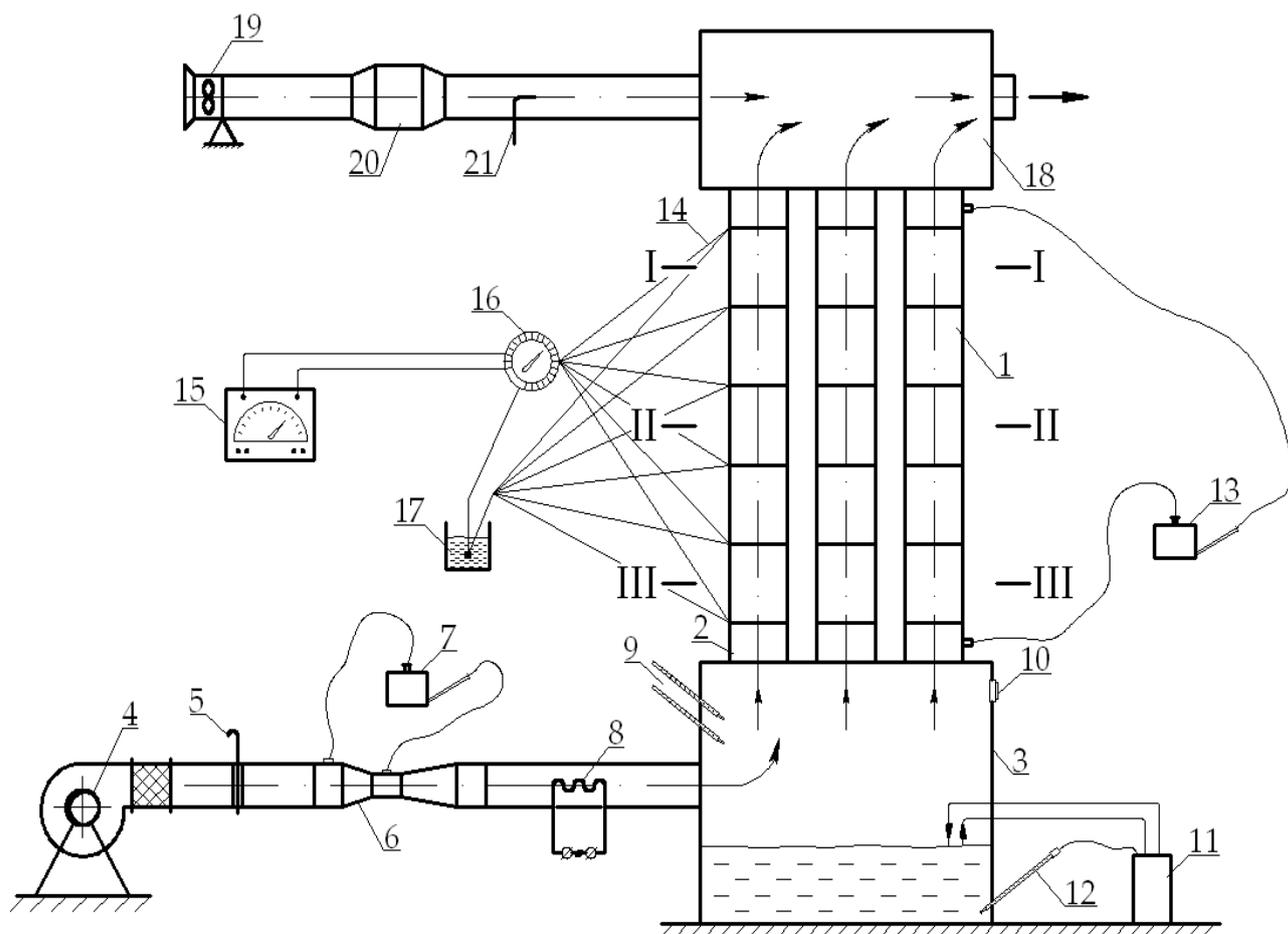


Рис. 4.1. Схема экспериментального лабораторного стенда

ции Московского государственного строительного университета. Разрезная колонка 1 высотой 500 мм выполнена из органического материала и состоит из пяти одинаковых колец диаметром 150 мм каждый. Внутри колонки помещается исследуемый материал (сохнущая трава или сено). Между кольцами закладываются листы фильтровальная бумага. Колонки крепятся к опорным кольцам 2, расположенным в верхней части камеры приготовления воздуха 3. Воздух в камеру подается вентилятором 4, его расход регулируется шибером 5 и замеряется предварительно протарированным насадком Вентури 6 с помощью микроманометра с пневмометрической трубкой 7. Для поддержания заданной температуры воздуха в камере приготовления в воздуховоде установлен нагреватель воздуха 8. Параметры воздуха в камере 3 фиксируются сухим и мокрым термометрами 9. Температура и относительная

влажность подаваемого в колонки воздуха регулируются и доводятся до необходимых значений изменением подаваемой в камеру воды из термостата 11. Требуемая температура воды поддерживается с помощью контактного термометра 12. Расход подаваемого воздуха дополнительно регулируется выпуском фиксированного его количества из камеры 3 через калиброванные коллекторы 10. Перепад давлений в каждой колонке и статическое давление в камере измеряются микроманометром 13. Между кольцами колонок размещены термопары 14, холодный спай которых помещается в сосуд Дьюара 17. С помощью многоточечного переключателя 16 и потенциометра 15 фиксируются изменяющиеся по высоте слоя значения температуры.

Камера 18 предназначена для создания и регулирования температуры и относительной влажности воздуха с противоположных сторон каждой из колонок, что позволяет в необходимых пределах менять значения t_v и ϕ_v на входе и выходе из слоя сохнувшей травы. Этому процессу в конкретных случаях также могут способствовать установленные на подающей линии холодильная камера 20 и форсунка 21. Подача воздуха в камеру 18 осуществляется вентилятором 19.

Данная установка позволяет проводить исследования: динамики тепловлагопереноса в слое сохнувшей травы как при организованной механической фильтрации воздуха, так и без нее; значений удельной влагоемкости и влагопроводности травы; аэродинамического сопротивления слоя в зависимости от влажности и плотности прессования материала.

В результате лабораторных исследований были определены поля влагосодержания в слое сохнувшей травы. Один из характерных результатов исследований для луговой травы приведен на рис. 4.2. Локальные значения влагосодержания фиксировались в пяти точках по высоте слоя (в центре каждого из колец разрезной колонки). Общая продолжительность сушки составляла 24 ч. Вполне очевидным представляется продвижение в процессе сушки слоя активно сохнувшей травы по направлению движения

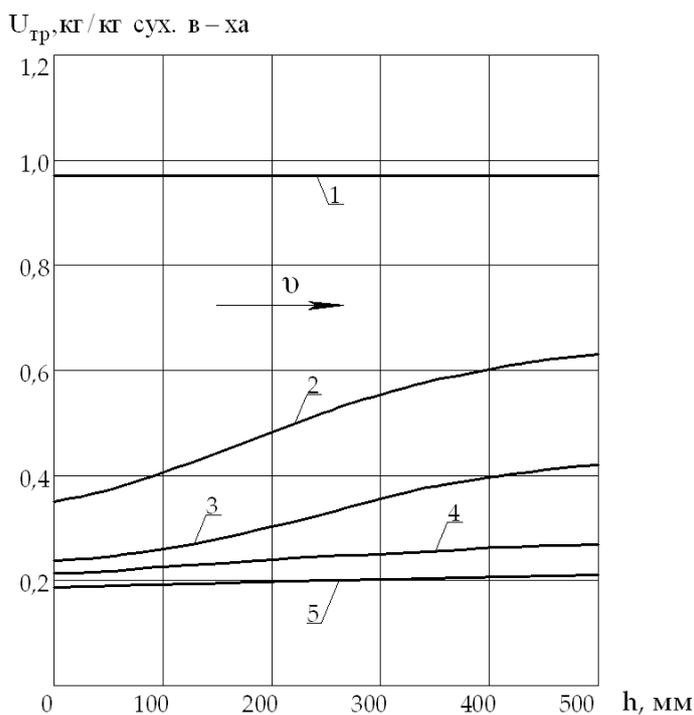


Рис. 4.2. Распределение полей влагосодержания в слое сохнущей луговой травы в различные периоды сушки: 1 – $\tau = 0$ ч; 2 – $\tau = 6$ ч; 3 – $\tau = 12$ ч; 4 – $\tau = 18$ ч; 5 – $\tau = 24$ ч

воздуха (продувка по схеме «снизу вверх») и снижение интенсивности влагоотдачи ввиду углубления зоны испарения по мере снижения влагосодержания травы, особенно в нижележащих слоях.

В процессе экспериментальных исследований изучались также закономерности изменения интенсивности и скорости сушки для бобовых трав (клевера), позволяющие определить значения

влагосодержания материала в любой момент времени и представляющие качественную картину течения процесса сушки в ее различные периоды. На рис. 4.3 и 4.4 в качестве примера приведены экспериментально

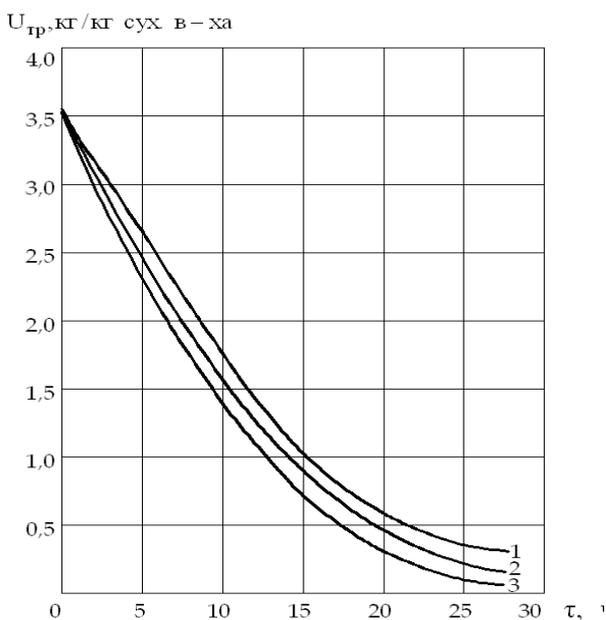


Рис. 4.3. Изменение интенсивности сушки клевера: 1 – для сечения I-I (рис. 4.1); 2 – для сечения II-II; 3 – для сечения III-III

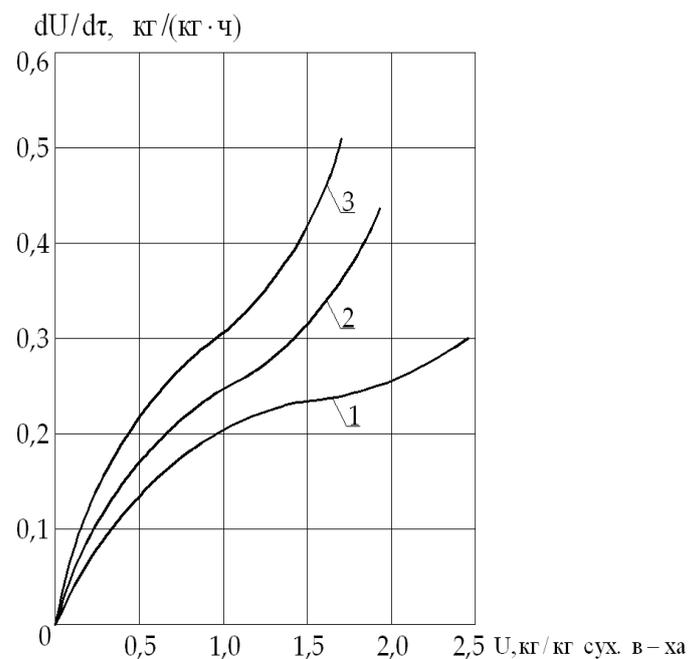


Рис. 4.4. Изменение интенсивности скорости сушки клевера: 1 – для сечения I-I (рис. 4.1); 2 – для сечения II-II; 3 – для сечения III-III

полученные характеристики изменения интенсивности сушки $u_{\text{тр}} = f(\tau)$, скорости сушки $du_{\text{тр}}/d\tau = f(u)$ по сечениям разрезной колонки для клевера.

Зависимость $du_{\text{тр}}/d\tau = f(u)$ в период убывающей скорости сушки (рис. 4.4), занимающий по времени основную часть процесса сушки травы, имеет вид типичной кривой скорости сушки для любых коллоидных капиллярно-пористых тел [28].

Однако многочисленные опыты обнаружили большие затруднения при определении первой критической точки, характеризующей переход влагосодержания травы из области значений выше гигроскопической, в область, где влагосодержание становится ниже гигроскопической. По нашему мнению, точки, завершающие кривые скорости сушки (рис. 4.4), и следует рассматривать, как первые критические точки, являющиеся граничными между периодами постоянной и падающей скоростями сушки.

4.2. ОБОБЩЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СУШКИ ТРАВЫ

Натурные исследования позволили провести практическую проверку закономерностей динамики сушки рассыпного и прессованного сена и режимов работы систем активной вентиляции в реальных условиях. Было смонтировано несколько установок в хозяйствах Нижегородской области. Ниже приводятся результаты общего анализа по двум хозяйствам.

Исследования динамики температурных и влажностных полей при сушке травы для получения рассыпного сена с применением систем активной вентиляции неподогретым воздухом проводились в Опытном производственном хозяйстве «Центральное» Нижегородской государственной областной сельскохозяйственной станции. Схема опытно-промышленной площадки приведена на рис. 4.5.

На установках 1 и 2 были смонтированы центробежные вентиляторы Ц4-70 № 12,5; $n_{\text{в}} = 600$ об./мин.; схемы исполнения 6; $L_{\text{в}} = 55\ 000$ м³/ч; электродвигатели имели $n_{\text{эл}} = 970$ об./мин.; $N = 17$ кВт. Размеры скирд (в м)

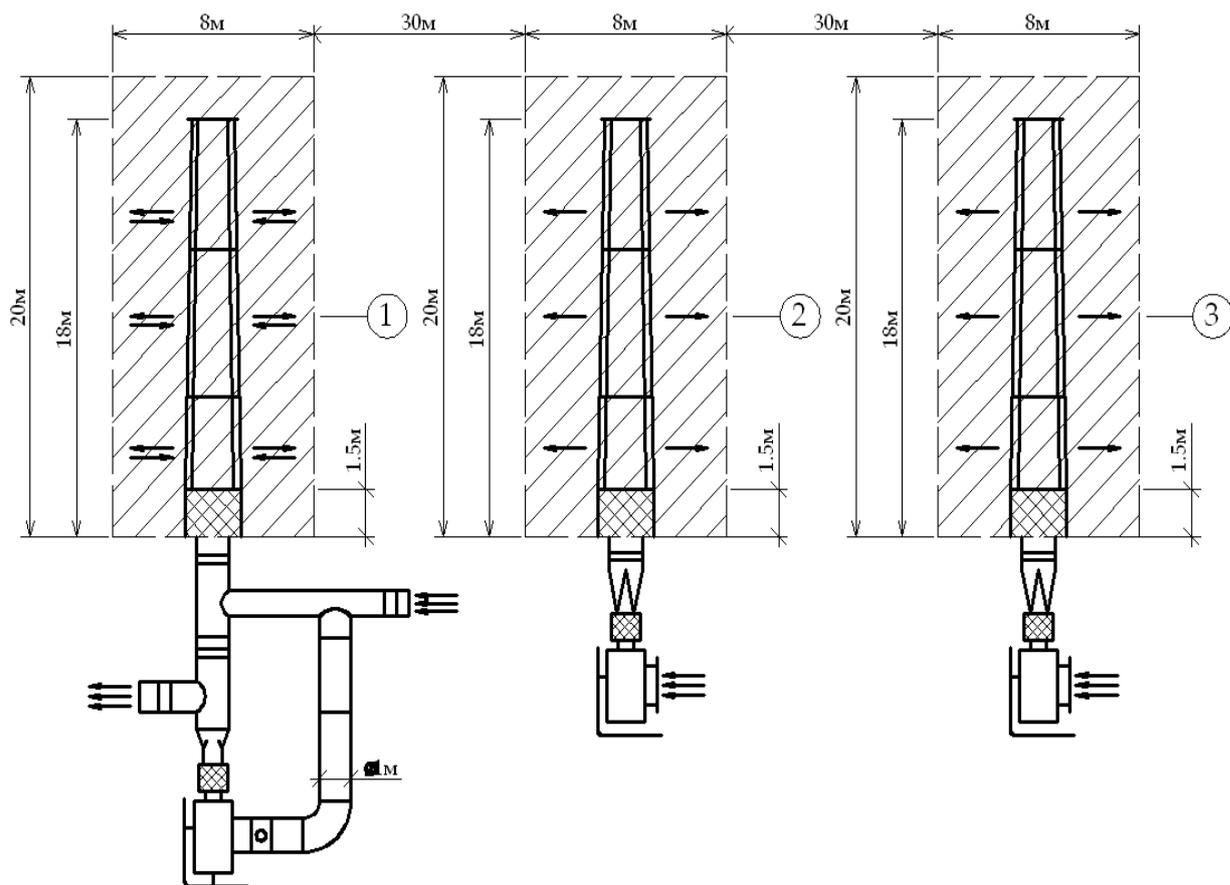


Рис. 4.5. Размещение установок САВ на опытно-промышленной площадке: 1 – подача воздуха «снизу вверх» или «сверху вниз»; 2, 3 – подача воздуха «снизу вверх»

20x8x6, масса сухого сена около 60 т в каждой. На единицу массы высушенной травы удельный расход воздуха составлял $L_m \approx 920 \text{ м}^3/(\text{т}\cdot\text{ч})$, что несколько меньше рекомендуемых в практике хранения величин удельных расходов. Установка № 3 была снабжена вентилятором Ц4-70 № 10; $n_v = 970 \text{ об./мин.}$; схема исполнения 1; $L_v = 45\,000 \text{ м}^3/\text{ч}$; электродвигатель мощностью $N = 22 \text{ кВт}$; $n_{эл} = 970 \text{ об./мин.}$ Высота скирды составляла около 5 м; масса сухого сена в ней приближалась к 50 т; удельный расход воздуха был равен $L_m = 900 \text{ м}^3/(\text{т}\cdot\text{ч})$. Все три установки имели трапециевидные секционные разборные воздухораспределительные каналы длиной по 18 м. Всего за каждый из двух сезонов испытаний на опытно-промышленной площадке было получено по 170 т рассыпного длинностебельчатого сена.

Особенностью установки САВ № 1 являлась возможность продувки скирды как по схеме «снизу вверх» (подача воздуха в слой сохнувшей тра-

вы), так и по схеме «сверху вниз» (отсасывание воздуха из скирды). Изменение направления движения воздуха осуществлялось путем перекрытия соответствующих воздуховодов, смонтированных между вентилятором и скирдой.

На первую и третью установки систем активной вентиляции укладывалась злаковая трава, на вторую – бобовая трава (люцерна). Влажность одновременно закладываемой в скирды травяной массы колебалась в широких пределах от 30 до 55 %.

В процессе сушки травы и хранения сена за один опыт проводились измерения температур и относительных влажностей воздуха по объему скирды в 11 сечениях на высотах 1,0 м и 2,0 м, всего в 88 точках, показанных на рис. 4.6.

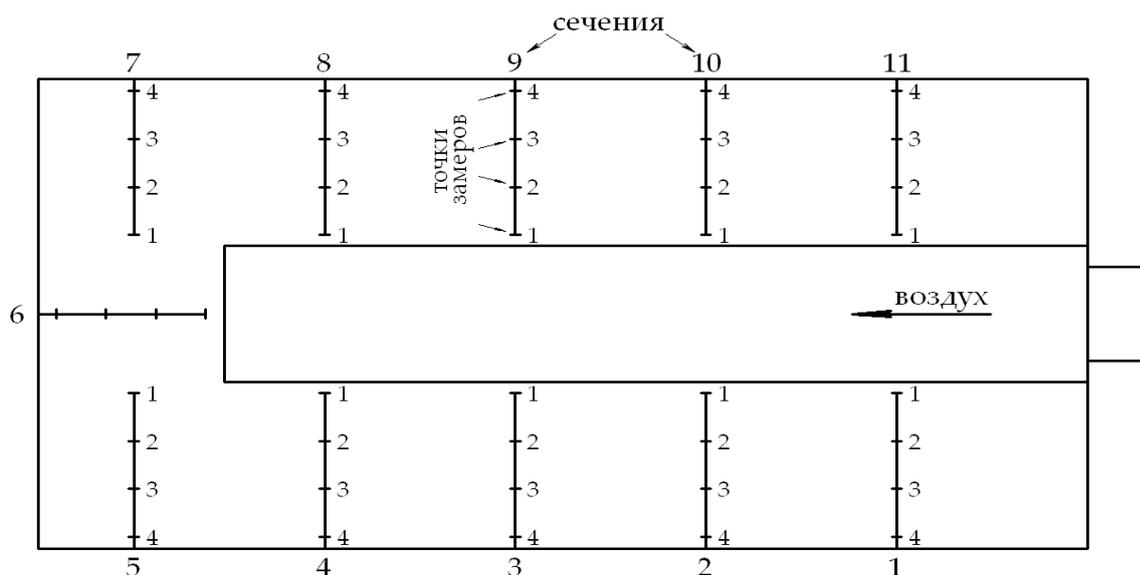


Рис. 4.6. Места замеров температуры, относительной влажности и потенциала влажности сохнущей травы и сена в в скирдах

Для оперативного контроля за влажностью в процессах сушки травы и хранения сена в объеме скирды авторами был спроектирован и изготовлен термовлагощуп длиной 2,0 м. Принципиальная схема работы термовлагощупа показана на рис. 4.7. Он состоит из пяти стальных трубок l диаметром 10 мм и длиной 200 мм каждая. Трубки соединены между собой латунными муфтами 2 с отверстиями диаметром 2 мм, расположен-

ными по всей поверхности муфт. В разъемные муфты термовлагощупа помещаются медноконстантановые термопары 3 для определения температуры сохнущей массы. Переключение термопар осуществляется тумблером 4, холодные концы термопар помещаются в емкость с тающим льдом 5 (сосуд Дьюара). Измерение значений ЭДС термопар проводилось с помощью потенциометра ПП-63 6. Точность измерений $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$.

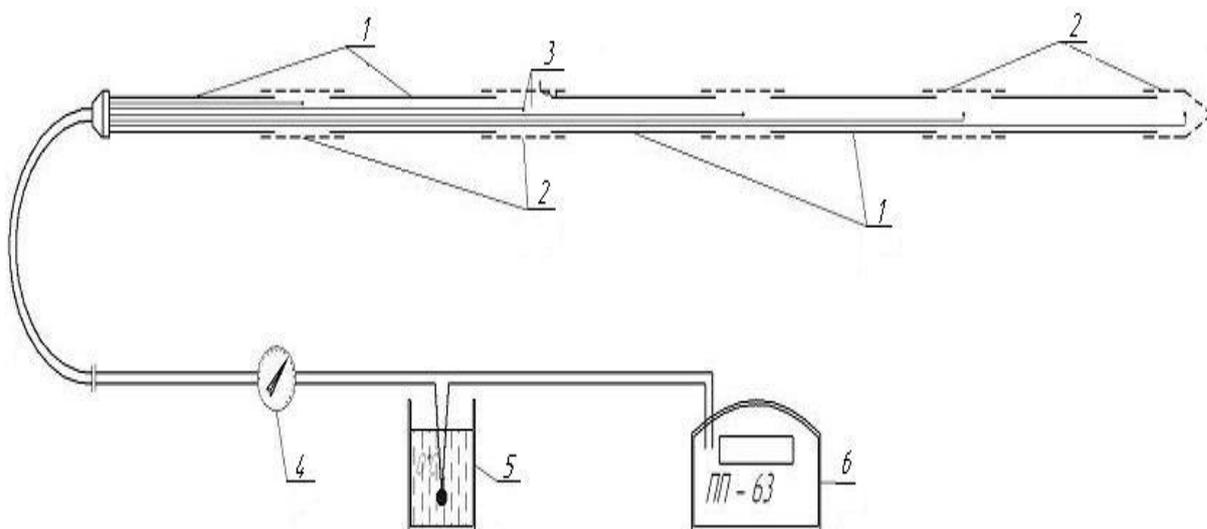


Рис. 4.7. Схема устройства и работы термовлагощупа

В муфты термовлагощупа помещается фильтровальная бумага, влажность которой принимается за основу при последующем определении значений потенциалов влажности. По влагосодержанию фильтровальной бумаги, определяемому взвешиванием, и температуре в слое травы или сена с помощью кривых сорбции фильтровальной бумаги (рис. 3.8) находится относительная влажность воздуха в слое.

Термовлагощуп может быть использован не только при контроле процесса заготовки сена, но и при сушке зерна, при регулировании и оптимизации процессов тепломассообмена в насыпи сочного растительного сырья и в объеме хранилищ в целом, при контроле и анализе температурно-влажностных параметров микроклимата животноводческих помещений. Изготовление и эксплуатация переносных термовлагощупов под силу любому хозяйству.

По кривым десорбции злаковых (луговой) и бобовых (люцерна) трав и зависимости относительной влажности воздуха от потенциала влажности нами для температур 15, 20, 30 и 40 °С построены кривые десорбции в координатах $\omega_{\text{тр}} - \theta$, °В (рис. 3.11, 3.12). Они являются исходными характеристиками при расчете интенсивности сушки продуваемого воздухом слоя травы.

Осуществлялся ежедневный контроль температурного режима всего объема скирд и выборочный через 2...3 дня за относительной влажностью воздуха и влажностью сохнувшей в скирдах травы. На рис. 4.8 приведена динамика изменения температуры по объему скирды № 2 (преобладание люцерны) в один из дней сезона заготовки (точки замеров показаны на рис. 4.6).

Продуваемый через слой травы воздух насыщается влагой, по мере снижения влажности травы относительная влажность воздуха в слое уменьшается. В табл. 4.1 приведены осредненные экспериментальные зна-

Т а б л и ц а 4.1

Значения $\varphi_{\text{в.вых}}$ в скирде сохнувшей люцерны

Дата	$\omega_{\text{тр}}$, %	$\varphi_{\text{во}}$, %	$\varphi_{\text{в.вых}}^{\text{ср}}$, %	Диапазон $\varphi_{\text{в.вых}}$, %
06.07	35...55	95	95	95
07.07	35...55	74	92	88...95
09.07	23...28	70...75	83	80...87
12.07	-	50...55	78	66...85
17.07	18...20	54...60	74	65...78

чения по всем точкам замеров относительной влажности воздуха, выходящего из скирды, $\varphi_{\text{в.вых}}^{\text{ср}}$, и зафиксированный диапазон колебаний $\varphi_{\text{в.вых}}$. Существенный диапазон колебаний величины $\varphi_{\text{в.вых}}$ можно объяснить различной начальной влажностью травы по объему скирды и вызванный этим фактором неравномерностью скорости ее сушки.

Контрольные измерения температуры и влажности рассыпного сена в процессе хранения, проведенные в октябре и ноябре месяцах трех лет ис-

следований Нижегородской государственной областной сельскохозяйственной опытной станцией, показал, что все сено, высушенное на установках, соответствовало по питательности 1 классу. Одна из серий замеров качества сена за период сушки и хранения приведена в таблице 4.2.

Т а б л и ц а 4.2

Результаты замеров качества сена в период сушки и хранения

№№ п/п	Дата анализа	Номер установки	Номер пар- тии сена	Ботанический состав сена	Влаж- ность, %	Содержание ка- ротина, мг/кг
1	10.07	1	1	злаковые	24,0	31,2
2	10.07	1	2	злаковые	32,5	36,9
3	10.07	1	3	злаковые	35,5	28,8
4	23.07	1	1	злаковые	18,6	31,8
5	23.07	1	2	злаковые	16,3	19,4
6	04.08	2	1	люцерна	55,0	18,2
7	04.08	2	2	люцерна	31,0	18,2
8	06.08	3	4	злаковые	43,2	48,6
9	06.08	2	1	люцерна	28,0	8,84
10	06.08	2	2	люцерна	26,4	14,6
11	10.08	2	1	люцерна	21,0	18,7
12	10.08	2	2	люцерна	25,0	14,04
13	23.08	1	2	злаковые	11,0	30,16
14	23.08	2	2	люцерна	12,5	14,04
15	23.08	3	1	злаковые	17,0	52,5
16	11.11	1	1	злаковые	14,0	19,3
17	11.11	2	2	люцерна	16,0	10,1
18	11.11	3	3	злаковые	16,6	26,5

В процессе натуральных исследований выявить темп самосогревания сохнувшей травы ($\Delta t/\Delta \tau$) во всем объеме скирды не представлялось возможным. Различная начальная влажность травы ($\omega_{тр} = 35...55\%$) в формируемых скирдах вызвала изменения локальной интенсивности биологических тепловыделений. Замеры темпа самосогревания травы в локальных зонах скирд № 1, № 2 и № 3 проводились в ночное время при отключенных системах активной вентиляции. Значения скоростей самосогревания в каждом сечении ($\Delta t/\Delta \tau$) и средние скорости $(\Delta t/\Delta \tau)_{ср}$, обобщенные по локальным зонам скирд, приведены в табл. 4.3.

Разница в темпах самосогревания трав различных ботанических составов (бобовых и злаковых) выявить не удалось. Зависимость ($\Delta t/\Delta \tau$) от влажности травы показана на рис. 4.9.

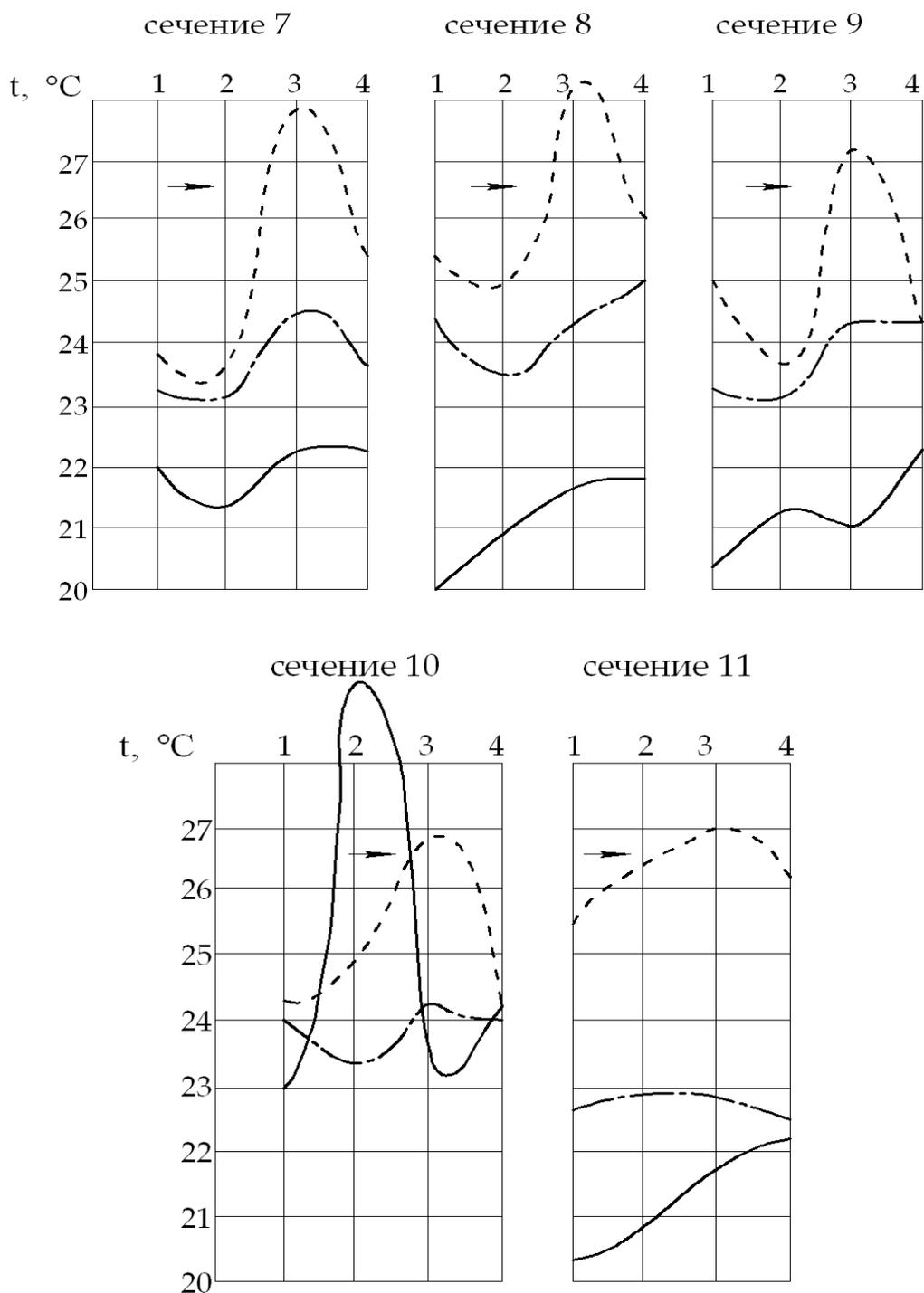


Рис. 4.8. Динамика изменения температуры воздуха в объеме скирды № 2 (продолжение рис. 4.8)

Экспериментально полученная зависимость удельных тепловыделений при самосогревании сохнувшей травы за счет биологических тепловыделений $q_{СРС} = f(\omega_{тр})$ представлена на рис. 4.10. Аппроксимация полученной кривой дала следующий результат:

$$q_{СРС} = 383,2 \omega_{тр}^{4,408} \exp(-2,925\omega_{тр}). \quad (4.1)$$

Темп самосогревания травы в скирдах № 1, № 2 и № 3

Даты замеров	$\omega_{\text{тр}}, \%$	№№ сечений (рис. 4.6)	$(\Delta t/\Delta \tau), ^\circ\text{C}/\text{ч}$	$(\Delta t/\Delta \tau)_{\text{ср}}, ^\circ\text{C}/\text{ч}$
06.07...07.07	35...55	2	0,6	1,13
		4	0,8	
		6	1,6	
		7	1,55	
		8	1,1	
		9	0,9	
		10	1,35	
09.07...10.07	23...28	2	0,21	0,19
		4	0,14	
		6	0,20	
		7	0,31	
		8	0,12	
		9	0,08	
		10	0,19	
17.07...18.07	18...20	2	0,0	0,06
		4	0,06	
		6	0,08	
		7	0,14	
		8	0,01	
		9	0,03	
		10	0,11	

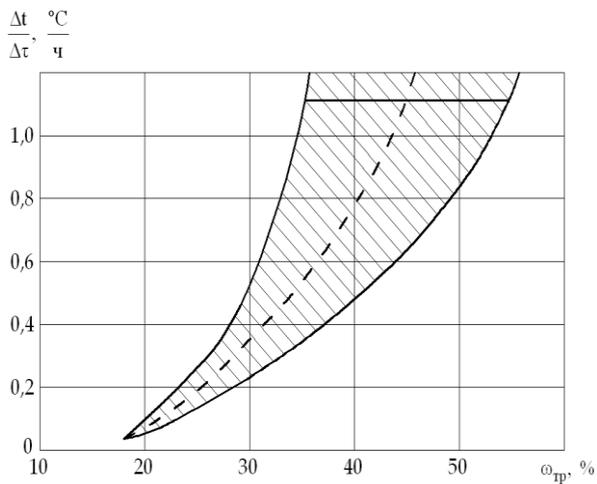


Рис. 4.9. Зависимость темпа самосогревания в скирде от влажности травы

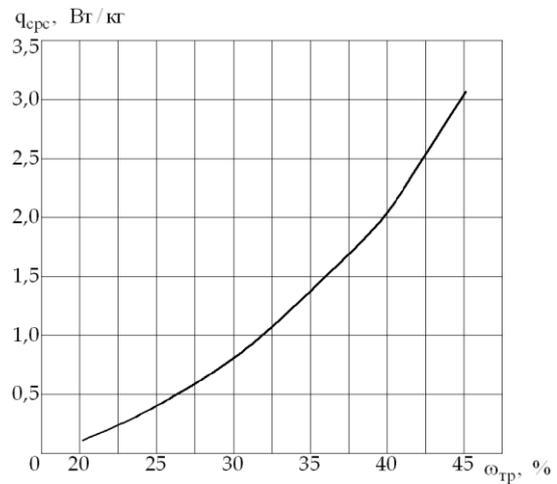


Рис. 4.10. Удельные тепловыделения травы

Удельные тепловыделения при известных значениях плотности насыпи травы определяются по графикам (рис. 4.11).

Контроль за процессами сушки и хранения прессованного в тюки и рулоны разнотравного лугового сена проводился в сенохранилище хозяйства «Ленинский путь» Нижегородской области. Хранилище имело шири-

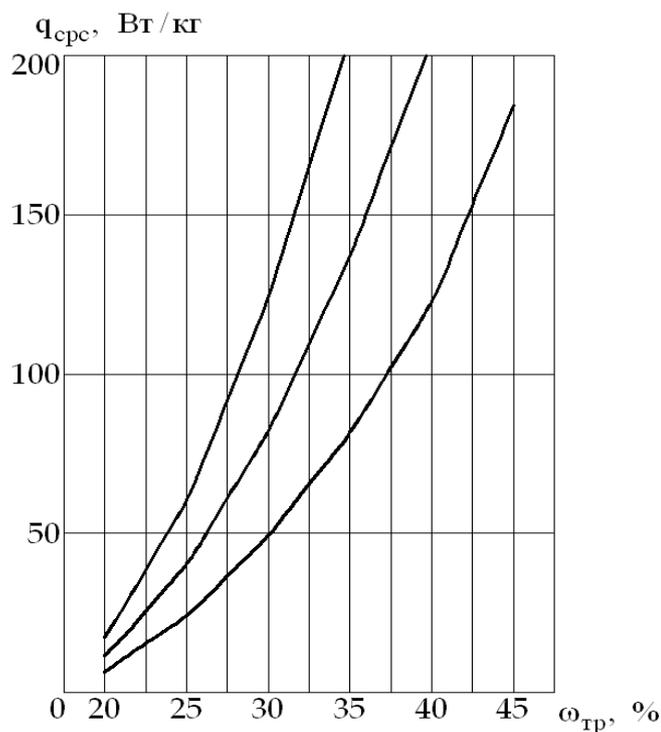


Рис. 4.11. Удельные тепловыделения слоя травы плотностью:
 1 – 60 кг/м³; 2 – 100 кг/м³; 3 – 150 кг/м³

ну 13 м, длину 60 м, высоту до ферм 6,5 м. Оно оборудовано 7 установками САВ, состоящими из вентиляторов Ц4-76 № 6,3, $L_v = 33\ 000\ \text{м}^3/\text{ч}$ каждого и деревянных воздухораспределительных каналов сечением 1,0x1,0 м и длиной 7,0 м. Каналы расположены поперек хранилища.

Масса прессованного сена достигала 500 т (около 70 т на каждую установку), высота штабеля 5,0 м, $L_m = 470\ \text{м}^3/(\text{т.ч})$. Трава в поле прессовалась с повышенной влажностью ($\omega_{\text{тр}}$ до 45 %) из-за неблагоприятных погодных условий (дождей). Для предотвращения самосогревания тюков САВ эксплуатировались по 12...14 часов в сутки наружным воздухом вне зависимости от наличия дождя. В результате удалось сохранить сено в удовлетворительном состоянии в течение 15...20 суток до наступления благоприятной для сушки сухой погоды и досушить его до кондиционной влажности без применения искусственных источников теплоты.

Натурные исследования подтвердили разработанную методику расчета режимов работы систем активной вентиляции, при сушке травы с ис-

пользованием $I-d$ -диаграммы влажного воздуха, и возможность досушки травы с влажностью до 55 % в скирдах, сформированных в один прием. Количественные и качественные характеристики питательных свойств сена были практически одинаковыми при досушке травяной массы различной начальной влажности, уложенной в одну скирду. Начальная разница значений $\omega_{\text{тр}}$ выравнивалась через 10...12 ч непрерывной работы САВ на неподогретом атмосферном воздухе. Для высушивания травы за 7...9 дней (до срока начала появления плесени) в климатических условиях Нечерноземной зоны РФ общее время работы САВ должно составлять 60...80 ч (при 10...12-часовой работе установок в сутки. Выполнение этих условий может быть достигнуто только при увеличении удельного расхода воздуха до $L_m = 2000...2500 \text{ м}^3/\text{ч}$ на 1 т сена кондиционной влажности.

В период постоянной скорости сушки ($\omega_{\text{тр}} > \omega_{\text{г}}$) увеличение производительности систем активной вентиляции приводит к пропорциональному уменьшению продолжительности сушки. При достижении слоев активно сохнущей травы границ скирды во всем ее объеме ($\omega_{\text{тр}} < \omega_{\text{г}}$) сушка происходит с падающей скоростью, эффективность воздуха как сушильного агента снижается. В таком режиме с целью экономии энергии возможно уменьшение количества воздуха, подаваемого в массу травы. Наличие двух или нескольких вентиляторов, работающих на одну систему, и возможность отключения части из них – наиболее простой и целесообразный путь регулирования расхода воздуха.

Вторым важным выводом из проведенных исследований является подтверждение положения о возможности досушки травы влажностью более 40...45 %. Анализ натуральных исследований показал, что и по потерям сухого вещества, и по качеству сена, и по времени работы систем активной вентиляции количественные и качественные характеристики конечного продукта были практически одинаковыми при досушке травы различной начальной влажности (до 55 %).

Подтвердилась и предполагаемая одинаковая эффективность сушки с нагнетанием воздуха в скирду (продувка «снизу вверх») и с отсасыванием воздуха из скирды через воздухораспределительные каналы (продувка «сверху вниз»). Опасения о возможной конденсации водяных паров вблизи воздухораспределительных каналов в центре объема скирд не оправдались. По нашему мнению, такая опасность имеет меньшую вероятность по сравнению с возможной конденсацией водяных паров на поверхности скирд при продувке «снизу вверх», т.к. повышается температура сохнувшей травы в центре скирд вследствие недостаточной интенсивности рассеивания выделяемой продукцией биологической теплоты.

4.3. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ИНТЕНСИВНОСТИ СУШКИ ТРАВЫ НА ОСНОВЕ ГРАДИЕНТА ПОТЕНЦИАЛА ВЛАЖНОСТИ

Использование изотерм десорбции трав для контроля сушки предполагает одновременную фиксацию двух независимых параметров процесса: температуры t_B и относительной влажности φ_B воздуха в слое. Нахождение значений t_B не представляет технических трудностей. В то же время определение в массе травы величины φ_B традиционным способом по температурам сухого и мокрого термометров практически невыполнимо из-за приближения температуры воздуха в слое к температуре мокрого термометра ($t_B \rightarrow t_{MT}$) и относительной влажности $\varphi_B \rightarrow 100\%$ в слое травы, продуваемого воздухом.

Нами предложен, обоснован и проведен в практических условиях способ контроля влажности уложенной в слой сохнувшей травы по обобщающему термодинамическому показателю – потенциалу влажности воздуха θ , °В.

Потенциал влажности воздуха определялся с помощью термовлагушпа (рис. 4.7), текущая влажность травы – по кривым десорбции в координатах $\omega_{тр} - \theta$, изображенных на рис. 3.11 и 3.12.

Последовательность замеров влажности сохнувшей травы была следующей. В муфты термовлагощупа вкладывались образцы фильтровальной бумаги, масса которых в абсолютно сухом состоянии m_c определялась после обработки и сушки в лабораторном шкафу. Термовлагощуп внедрялся в слой сохнувшей травы на 1,5 ч, после чего термопарами фиксировались температура t_b и на электронных весах ВЛТМ-500 увеличение массы фильтровальной бумаги Δm в каждой из пяти муфт. Известное влагосодержание фильтровальной бумаги u , кг/кг, и ее температура позволяли определять потенциалы влажности воздуха θ (рис. 3.8) и по ним искомую влажность сохнувшей травы $\omega_{тр}$ в различных сечениях по графикам (рис. 3.11 и 3.12). Некоторые результаты контрольных замеров значений влажности люцерны в процессе сушки и хранения приведены на рис. 4.12.

Применение потенциала влажности воздуха в качестве критерия контроля для процесса сушки травы упрощает проведение и увеличивает точность замеров влажности травы из-за возможности фиксации двух легко

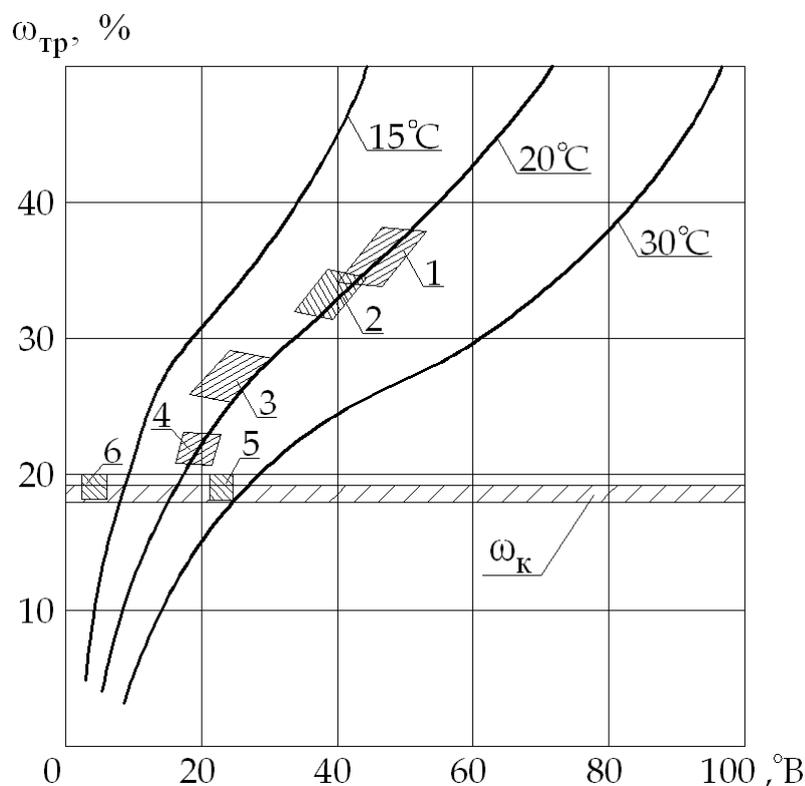


Рис. 4.12. Область экспериментальных значений потенциалов влажности воздуха в скирде люцерны (установка №2):
 1 – 06. 07; 2 – 0.7. 0.7; 3 – 09.07; 4 – 12.07; 5 – 17.07; 6 – 20..11 ($t_n = -3^\circ\text{C}$)

замеряемых физических величин – массы и температуры. Этот метод контроля влажности травы рекомендован нами для широкого практического применения.

Достижение сеном кондиционной влажности $\omega_k = 17...19\%$ однозначно фиксируется величиной потенциала влажности воздуха θ , °В, выходящего из слоя (рис. 3.11 и 3.12). Значения θ , характеризующие окончание процесса сушки, приведены в табл. 4.4.

Т а б л и ц а 4.4

Минимальные значения потенциала влажности воздуха, выходящего из слоя травы

$t_b, ^\circ\text{C}$	$\theta, ^\circ\text{В}$	
	злаковые	бобовые (люцерна)
15	27...28	9,0...9,5
20	36...37	16...17
30	60	31...31
40	-	62...64

Основной слой. Согласно теплофизической модели процесса сушки травы, в основном слое $\varphi_b = \text{const}$, $\omega_{\text{тр}} > \omega_{\text{г}}$, $\varphi_{\text{пов}} = 100\%$. Разность потенциалов влажности между поверхностью травы и воздухом равна [11]:

$$\Delta\theta_{\text{т}} = 0,204(100 - \varphi_p). \quad (4.2)$$

На основании полученной нами путем математической обработки данных значений термодинамических свойств влажного воздуха зависимости (3.6) тепловлажностного отношения для диапазона температур $t = 15...35\text{ }^\circ\text{C}$, общее количество испаряющейся из травы влаги с учетом (3.3) составляет:

$$W = q_v G_{\text{тр}} / (6385 - 88t). \quad (4.3)$$

Разделив количество испарившейся воды W на величину разности потенциалов влажности $\Delta\theta_{\text{т}}$, получим коэффициенты влагоотдачи в основном слое сохнувшей травы α_θ , кг/(т.ч.°В), или α_θ^1 , кг/(м³.ч.°В), показывающие количество кг влаги, испаряющейся из 1 т или 1 м³ травы при разности потенциалов 1 °В.

С учетом (4.2) и (4.3) коэффициенты влагоотдачи равны:

$$\alpha_{\theta} = \omega / \Delta\theta = q_v / 0,204(100 - \varphi_p)(6385 - 88 t); \quad (4.4)$$

$$\alpha_{\theta}^1 = \alpha_{\theta} \rho_{\text{тр}} = q_v \rho_{\text{тр}} / 0,204(100 - \varphi_p)(6385 - 88 t). \quad (4.4^1)$$

Результат расчетов по (4.3), (4.4) или (4.4¹) значений α_{θ} и α_{θ}^1 при $\varphi_p = 98\%$ сведены в табл. 4.5. Массовая плотность травы $\rho_n = 110 \text{ кг/м}^3$.

Объемный коэффициент влагоотдачи $\alpha_{\theta}^1 = 0,11\alpha_{\theta}$. Графическая зависимость $\alpha_{\theta} = f(t)$ показана на рис. 4.13. Приведенные значения коэффициента α_{θ} усреднены по периоду сушки и ботаническим сортам травы.

Т а б л и ц а 4.5

Значения коэффициента α_{θ}

Показатели	$t = 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$t = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$t = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$t = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$
α_{θ} , кг/(т.ч.°В)	0,484	0,530	0,580	0,704
α_{θ}^1 , кг/(м ³ ч.°В)	0,0532	0,0583	0,064	0,0774

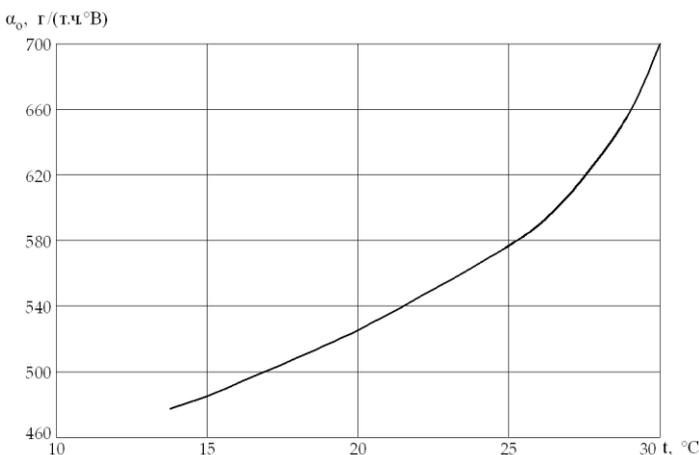


Рис. 4.13. Значения коэффициента α_{θ} в слое сохнувшей травы

Для аналитического определения величины коэффициента влагоотдачи в слое сохнувшей травы α_{θ} с достаточной для инженерных расчетов степенью точности предложено использовать следующие выражения:

$$\text{- при } t < 20 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \alpha_{\theta} = 8,15t + 363; \quad (4.5)$$

$$\text{- при } 20 \text{ }^{\circ}\text{C} < t < 25 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \alpha_{\theta} = 10,4t + 317; \quad (4.6)$$

$$\text{- при } 25 \text{ }^{\circ}\text{C} < t < 30 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \alpha_{\theta} = 23,8t - 27. \quad (4.7)$$

Следует отметить, что значения коэффициентов влагообмена α_{θ} зависят от многих факторов, в частности, от ботанического состава сохнувшей массы травы, физико-механических показателей слоя, режимов работы установок сушки травы.

Слой активно сохнущей травы (корректирующий)

В слое активно сохнущей травы разность потенциалов влажности поверхности сохнущей травы и вентиляционного воздуха равна [9]:

$$\Delta\theta_T = 1,22(t_{\text{пов}} - t_B) + 0,204(\varphi_{\text{пов}} - \varphi_B). \quad (4.8)$$

Экспериментальная зависимость количества испаряемой влаги за счет биологических тепловыделений скошенной травы (рис. 4.14 [41]) показывает, что при начальной влажности $25\% < \omega_{\text{тр}} < 45\%$ ($\omega_{\text{ср}} = 35\%$) около 25 % воды испаряется за счет теплоты дыхания. Влагопоглощающая способность воздуха с учетом утилизации теплоты самосогревания составляет (I - d -диаграмма, рис. 3.6):

$$\Delta d_k = d_4 - d_1 = 1,25(d_3 - d_1). \quad (4.9)$$

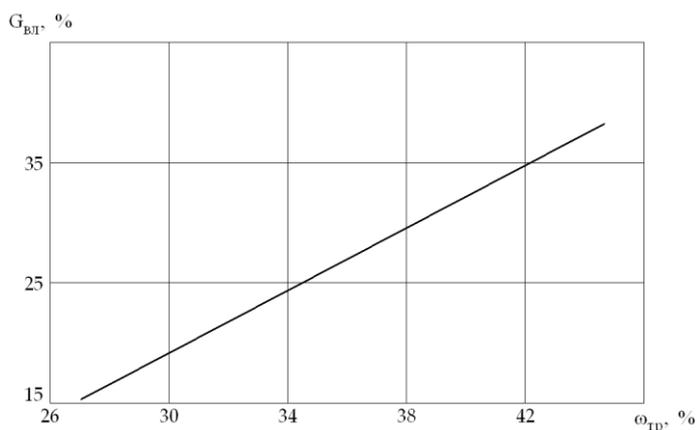


Рис. 4.14. Зависимость количества испаренной влаги за счет биологических тепловыделений q_v от влажности травы $\omega_{\text{тр}}$

метров наружного воздуха $t_H = 15 \dots 35$ °С, $\varphi_H = 50 \dots 95$ % и температуры травы $t_K = 15 \dots 30$ °С.

Аналогичные данные для гигроскопической области сушки ($\omega_{\text{тр}} < \omega_{\text{Г}}$) графически представлены на рис. 4.16.

Анализ графических зависимостей (рис. 4.15, 4.16) позволяет сделать ряд практических выводов и рекомендаций.

1. Увеличение относительной влажности подаваемого в слой травы воздуха φ_H , повышение его температуры t_H при $\varphi_H = \text{const}$, непрерывная продувка слоя, приводящая к уменьшению температуры травы t_K ($t_K \rightarrow t_{\text{МТ}}$) – все эти факторы снижают эффективность процесса сушки.

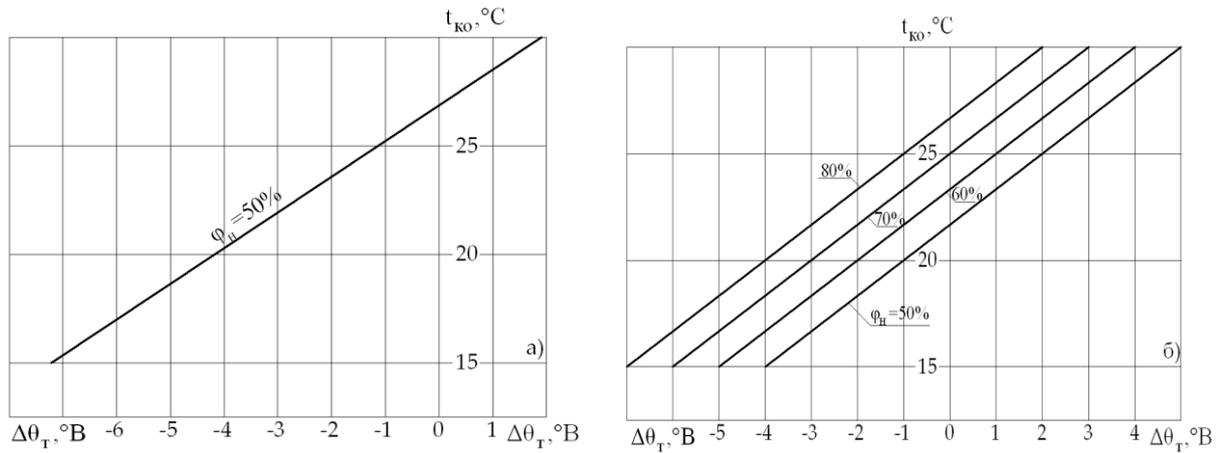


Рис. 4.15. Разность потенциалов влажности $\Delta\theta = f(t_H, t_{\text{ко}}, \phi_H)$ при $\omega_{\text{тр}} > \omega_{\text{г}}$ (сверхгигроскопическая область): а – $t_H = 35\text{ }^\circ\text{C}$; б – $t_H = 30\text{ }^\circ\text{C}$

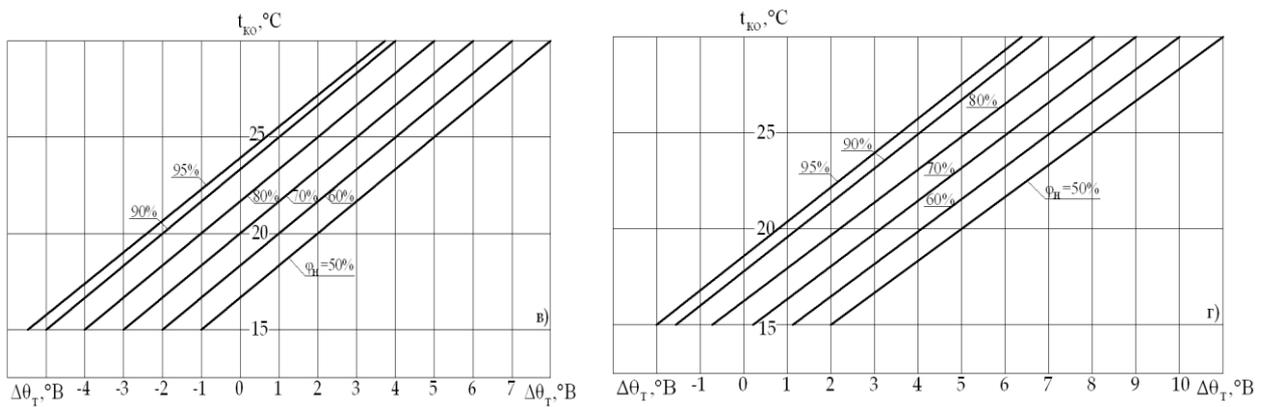


Рис. 4.15. Продолжение: в – $t_H = 25\text{ }^\circ\text{C}$; г – $t_H = 20\text{ }^\circ\text{C}$

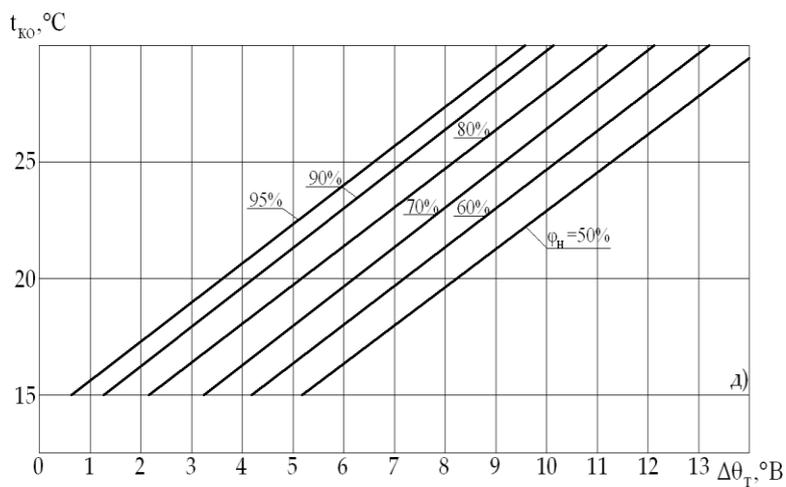


Рис. 4.15. Продолжение: д – $t_H = 15\text{ }^\circ\text{C}$

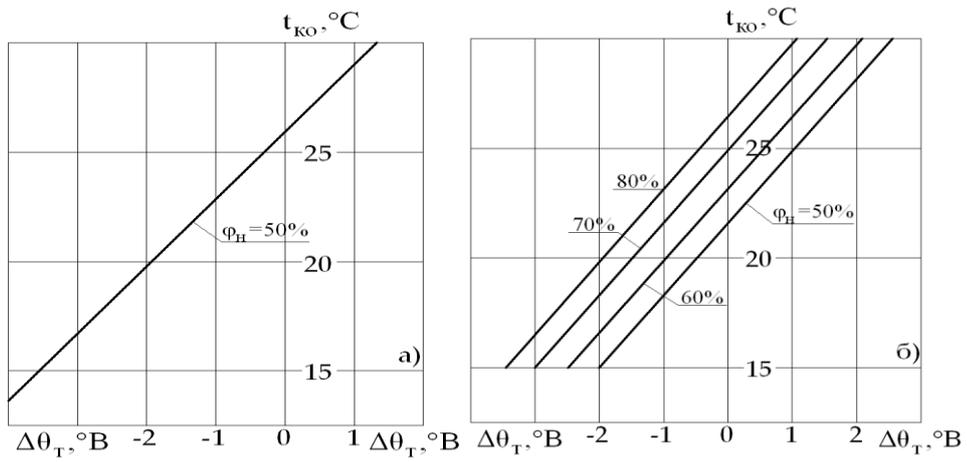


Рис. 4.16. Разность потенциалов влажности $\Delta\theta = f(t_H, t_{кo}, \varphi_H)$ при $\omega_{тр} < \omega_{г}$ (гигроскопическая область): а – $t_H = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$; б – $t_H = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$

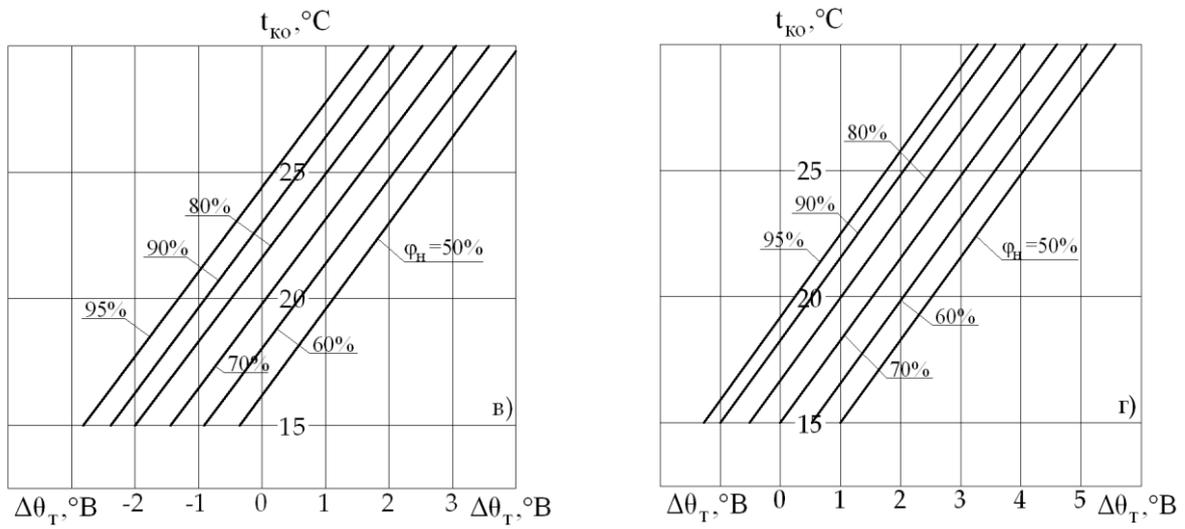


Рис. 4.16. Продолжение: в – $t_H = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$; г – $t_H = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

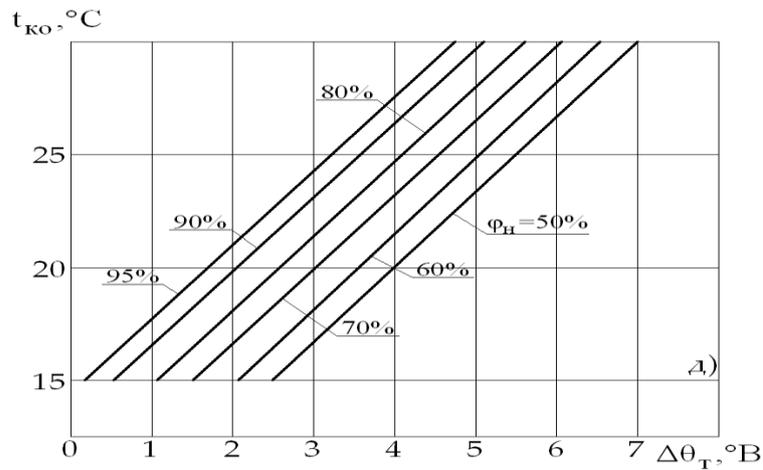


Рис. 4.16. Продолжение: д – $t_H = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$

2. Оптимизация длительности сушки травы и технико-экономических показателей процесса может быть достигнута введением циклических режимов работы систем активной вентиляции, чередующих самосогревание травы за счет биологических тепловыделений и последующего охлаждения, сопровождающегося сушкой.

3. Следует избегать режимов работы САВ при параметрах наружного воздуха и травы, характеризующихся областью, лежащей на рис. 4.15 и 4.16 слева от ординаты $\Delta\theta_r = 0$. В противном случае продувка слоя сопровождается увлажнением продукции.

4.4. ПОСТРОЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА НА $I-d-\theta$ -ДИАГРАММЕ

На базе общей теплофизической модели изменения состояния воздуха при продувке его через слой растительного сырья (рис. 3.6) построим основные процессы теплообмена между воздухом (сушильный агент) и сохнувшей травой (объект сушки) на $I-d-\theta$ -диаграмме (рис. 4.17).

Параметры приточного воздуха в точке 1: $t_{\text{во}}$, $\varphi_{\text{во}}$, $d_{\text{во}}$, $I_{\text{во}}$, $\theta_{\text{во}}$. Гипотетически влагопоглощающий потенциал воздуха достигает максимального значения при протекании процесса сушки по $t = \text{const}$ (луч 1-2). Влагопоглощающая способность воздуха при этом процессе равна $\Delta d_{\text{max}} = d_2 - d_1$. Наличие на поверхности материала свободной влаги обуславливает адиабатность этого процесса при $\omega_{\text{тр}} > \omega_r$ (луч 1-3). Величина равновесной относительной влажности воздуха в точке 3 $\varphi_3 = \varphi_p$ близка к $\varphi = 100\%$, что определяет время протекания процесса. Сорбционная способность воздуха составляет соответственно $\Delta d_a = d_3 - d_1$, $\Delta\theta_a = \theta_3 - \theta_1 > 0$. Теплота самосогревания повышает ассимилирующую способность воздуха до $d_k = d_4 - d_1$, соответственно отклоняя луч процесса (1-4) от изоэнтальпы $I_3 = I_{\text{во}} = \text{const}$ на величину, равноценную предварительному подогреву приточного воздуха, на $\Delta t_{\text{во}}$ (луч 1-5) и увеличивает разность потенциалов влажности до

$\Delta\theta_k = \theta_4 - \theta_1$. Параметры воздуха в точке 5 равны: $t'_{\text{во}} > t_{\text{во}}$, $\varphi'_{\text{во}} > \varphi_{\text{во}}$, $I'_{\text{во}} > I_{\text{во}}$, $d'_{\text{во}} = d_{\text{во}}$, $\theta'_{\text{во}} = \theta_{\text{во}}$.

С удалением несвязанной влаги с поверхности материала, т.е. при снижении влажности сырья до $\omega_{\text{тр}} < \omega_{\text{г}}$ имеет место перемещение зоны испарения в глубь слоя, наступает период падающей скорости сушки. При этом величина равновесной относительной влажности воздуха $\varphi_{\text{р1}}$, определяемая по кривым десорбции, значительно отличается от 100 %. Осушающий потенциал воздуха уменьшается до значений $\Delta d_{\text{р}} = d_6 - d_1$ (луч 1–6). Разность потенциалов влажности воздуха $\Delta\theta_{\text{р}} = \theta_6 - \theta_1$.

Ассимилирующую способность воздуха можно увеличить, предварительно нагревая его. Суммарное повышение температуры (луч 1–11) за счет искусственного подогрева (Δt) и биологических тепловыделений Q_6 на ($\Delta t_{\text{во}}$) дает увеличение влагопоглощающей способности продуваемого воздуха до величины $\Delta d_{\text{кр}} = d_9 - d_1$ при $\omega_{\text{тр}} < \omega_{\text{г}}$ (процесс 7–10). Интенсивность потока влаги определяется разностью потенциалов $\Delta\theta_{\text{кр}} = \theta_9 - \theta_1$ (при $\omega_{\text{тр}} > \omega_{\text{г}}$) и $\Delta\theta_{\text{рг}} = \theta_{10} - \theta_1$ (при $\omega_{\text{тр}} < \omega_{\text{г}}$).

При продувке основного слоя растительной массы относительная влажность воздуха остается постоянной $\varphi_4 = \varphi_{\text{р}} \approx 100\%$, однако процесс влагопоглощения не прекращается (луч 4–12) благодаря внутренним тепlopоступлениям ($Q_{\text{ак}} + Q_6$), в результате чего сорбционная способность воздуха составляет $\Delta d_{\text{ос}} = d_{12} - d_4$. Скорость процесса влагообмена определяется величиной $\Delta\theta_{\text{ос}} = \theta_{12} - \theta_4$.

Если температура продуваемого вентиляционного воздуха на входе в поверхностный слой превышает температуру самого слоя, то возможно образование фронта образования конденсата. При выборе режимов сушки биологически активного сырья необходимо учитывать, что фронт выпадения конденсата может смещаться и в основном слое сохнущего материала. Данное явление может наблюдаться при периодической работе САВ, когда температура воздуха на выходе из корректирующего слоя при возобновле-

нии продувки оказывается выше температуры самого основного слоя травы ($t_{\text{вп}} \sim t_{\text{н}}$). Предварительный перегрев воздуха на величину большую, чем $\Delta t_{\text{кон}} = t_{13} - t_1$, также может вызвать выпадение конденсата.

Для Центральной полосы России и Поволжья, где в период послеуборочной обработки растительного сырья (июнь – август) часто наблюдаются дожди, весьма актуальным является вопрос обеспечения качественной корректировки режимов работы систем активной вентиляции.

Изменение параметров наружного воздуха в период кратковременных дождей можно в первом приближении считать адиабатным (процесс 1–3) до линии $\varphi \sim 100\%$. Рассмотрим возможность продувки штабеля растительного сырья во время дождя воздухом с начальными параметрами $t_{\text{во}}$ и $\varphi_{\text{во}}$ (точка 1) без увлажнения продукции. Очевидно, что продувка подсушенного материала ($\omega_{\text{тр}} < \omega_{\text{р}}$) воздухом, подогретым до значений параметров точки 14 (луч 3–14) на $\Delta t_{\text{д}} = t_{14} - t_3$, не даст положительного результата. Отрицательное значение разности потенциалов $\Delta\theta = \theta_{14} - \theta_3$ подтверждает факт увлажнения продукции. Следовательно, только дополнительный нагрев воздуха выше значения t_{14} позволяет воздуху абсорбировать влагу из слоя сырья. В этом случае влагопоглощающая способность воздуха при перегреве его до температуры t_{15} составляет $\Delta d_{\text{др}} = d_{18} - d_{15}$ при движущей силе массопереноса $\Delta\theta_{\text{др}} = \theta_{18} - \theta_{15}$.

Количество теплоты, необходимое для нагрева воздуха до требуемых в период дождей параметров, находится по (3.8), а полезно используемая на сушку часть теплоты – по (3.9).

Рассмотрим конкретные примеры использования I – d – θ -диаграммы влажного воздуха для расчетов интенсивности и времени сушки травы.

Пример 4.1. Начальные параметры подлежащей сушке травы (тимофеевка), уложенной в скирду массой $G_{\text{тр}} = 50$ т, равны $\omega_{\text{тр}} = 40\%$, $t_{\text{к}} = 15$ °С. Соответствующая равновесная относительная влажность воздуха $\varphi_{\text{р}} = 93\%$ (рис. 1.2). Параметры атмосферного воздуха в точке 1 (рис. 4.18): $t_{\text{во}} = 18$ °С, $\varphi_{\text{во}} = 50\%$ ($K_{\text{об}} = 0,95$). Заштрихованная область на рис. 4.18 ограничивает значения параметров наружного воздуха с коэффициентом обеспеченности $K_{\text{об}} = 0,9$. По I – d – θ -диаграмме влажного воздуха определим $d_1 = d_{\text{во}} = 6,4$ г/кг сух. в-ха, $I_1 = I_{\text{во}} = 34,5$ кДж/кг, $\theta_1 = \theta_{\text{во}} = 16$ °В. Система активной вентиля-

ции оборудована вентиляционным агрегатом производительностью $L_B = 70\ 000\ \text{м}^3/\text{ч}$. Мощность, потребляемая вентилятором, $N_B = 22,0\ \text{кВт}$.

Если бы объект сушки не обладал биологической активностью, то процесс сушки материала был бы адиабатным и изображался на $I-d-\theta$ -диаграмме лучом $I-2$. Параметры воздуха в точке 2: $t_2 = 13\ \text{°C}$, $d_2 = 8,6\ \text{г/кг сух. в-ха}$, $\varphi_2 = \varphi_p = 93\ \%$. Потенциал влажности в точке 2 находится по зависимости: $\lg\theta = 0,12d - 0,049t + 1,056$ [27].

$$\lg\theta_2 = 0,12 \cdot 8,6 - 0,049 \cdot 13 + 1,056 = 1,451. \quad \theta_2 = 10^{1,451} = 28,4\ \text{°В}.$$

Данное значение и значение потенциала влажности в точке 2 $\theta_2 = 25,5\ \text{°В}$, определенное графически по $I-d-\theta$ -диаграмме, лежат в пределах погрешности $\pm 10\ \%$.

Ассимилирующая способность воздуха $\Delta d_a = d_2 - d_1 = 8,6 - 6,4 = 2,2\ \text{г/кг сух. в-ха}$. Градиент влагопереноса $\Delta\theta_a = \theta_2 - \theta_1 = 25,5 - 16 = 9,5\ \text{°В}$.

Средняя удельная величина биологических тепловыделений равна (4.1):

$$q_v = 383,2 \cdot 0,4^{4,408} \cdot \exp(-2,925 \cdot 0,4) = 2,09\ \text{Вт/кг}.$$

Суммарные тепловыделения скирдой составляют: $Q_6 = G_{\text{тр}} \cdot q_v = 50 \cdot 10^3 \cdot 2,09 = 104,5\ \text{кВт}$, что соответствует повышению температуры продувочного воздуха на

$$\Delta t_B = Q_6 / L_B \cdot c_B \cdot \rho_B = 3,6 \cdot 104,5 \cdot 10^3 / 70 \cdot 10^3 \cdot 1,2 \cdot 1 = 4,5\ \text{°C}.$$

Процесс сушки биологически активного сырья будет идти до точки 3, параметры воздуха в которой равны: $t_3 = 15\ \text{°C}$, $d_3 = 9,7\ \text{г/кг сух. в-ха}$, $\theta_3 = 27,4\ \text{°В}$, $\varphi_3 = \varphi_p = 93\ \%$.

Сорбционная способность воздуха увеличивается до $\Delta d_k = d_3 - d_1 = 9,7 - 6,4 = 3,3\ \text{г/кг сух. в-ха}$. Разность потенциалов влажности $\Delta\theta_k = \theta_3 - \theta_1 = 27,4 - 16 = 11,4\ \text{°В}$.

Коэффициент массообмена (4.5): $\alpha_0 = 8,15 \cdot 15 + 363 = 485\ \text{г/(т} \cdot \text{ч} \cdot \text{°В)}$.

Количество удаляемой влаги: $W = \alpha_0 (\theta_3 - \theta_1) G_{\text{тр}} = 485 \cdot 11,4 \cdot 50 = 276,5\ \text{кг/ч}$.

Минимальный расход воздуха, необходимый для ассимиляции такого количества влаги из травы, равен: $L_B = W / \rho_B (d_3 - d_1) = 276,5 / 1,2 (9,7 - 6,4) = 69,8 \cdot 10^3\ \text{м}^3/\text{ч}$, т.е. система активной вентиляции должна быть оборудована вентиляционным агрегатом производительностью $L_B \geq 70\ 000\ \text{м}^3/\text{ч}$.

Переход процесса сушки в гигроскопическую область осуществляется при достижении травой влажности $\omega_{\text{тр}} = \omega_r \approx 31\ \%$ (кондиционная влажность готовой продукции $\omega_k = 19\ \%$).

Масса удаляемой из травы влаги при изменении ее влажности от $\omega_{\text{тр}}$ до ω_r находится по зависимости: $G_{\text{вл}}^r = G_{\text{тр}} (\omega_{\text{тр}} - \omega_r) / (100 - \omega_r) = 50(40 - 31) / (100 - 31) = 6,52\ \text{т}$.

Масса влаги, удаляемой из травы в процессе досушки до кондиционной влажности ω_k , определяется как:

$$G_{\text{вл}}^k = (G_{\text{тр}} - G_{\text{вл}}^r) (\omega_{\text{тр}} - \omega_r) / (100 - \omega_r) = (50 - 6,52)(31 - 19) / (100 - 19) = 6,44\ \text{т}.$$

Минимальное время сушки травы до кондиционной влажности с учетом снижения скорости ассимиляции влаги в период падающей скорости сушки равно:

$$\tau = 10^3 \cdot G_{\text{вл}}^r / W + 2 \cdot 10^3 \cdot G_{\text{вл}}^k / W = 10^3 \cdot 6,52 / 276,5 + 2 \cdot 10^3 \cdot 6,44 / 276,5 = 23,6 + 46,6 = 70,2\ \text{ч}.$$

Анализ опытных данных по практическому использованию солнечных коллекторов и результаты проведенных натурных исследований показали, что минимальная величина предварительного подогрева наружного воздуха в солнечном коллекторе составляет $\Delta t_{\text{сол}} = 5\ \text{°C}$. Ассимилирующая способность воздуха в этом случае возрастает до $\Delta d_{\text{кт}} = d_6 - d_5 = 10,9 - 6,4 = 4,5\ \text{г/кг сух. в-ха}$. Разность потенциалов влажности $\Delta\theta_{\text{кт}} = \theta_6 - \theta_5 = 29 - 16 = 13\ \text{°В}$. Следует отметить, что дополнительный подогрев атмосферного воздуха в системах солнечного подогрева не изменяет значений потенциала влажности θ наружного воздуха, но увеличивает движущую силу тепломассопереноса $\Delta\theta$ внутри слоя.

Интенсивность влагоудаления: $W' = 485 \cdot 13 \cdot 50 = 315,3\ \text{кг/ч}$.

Продолжительность процесса сушки:

$$\tau^I = 10^3 \cdot 6,52 / 315,3 + 2 \cdot 10^3 \cdot 6,44 / 315,3 = 20,7 + 40,8 = 61,5\ \text{ч}.$$

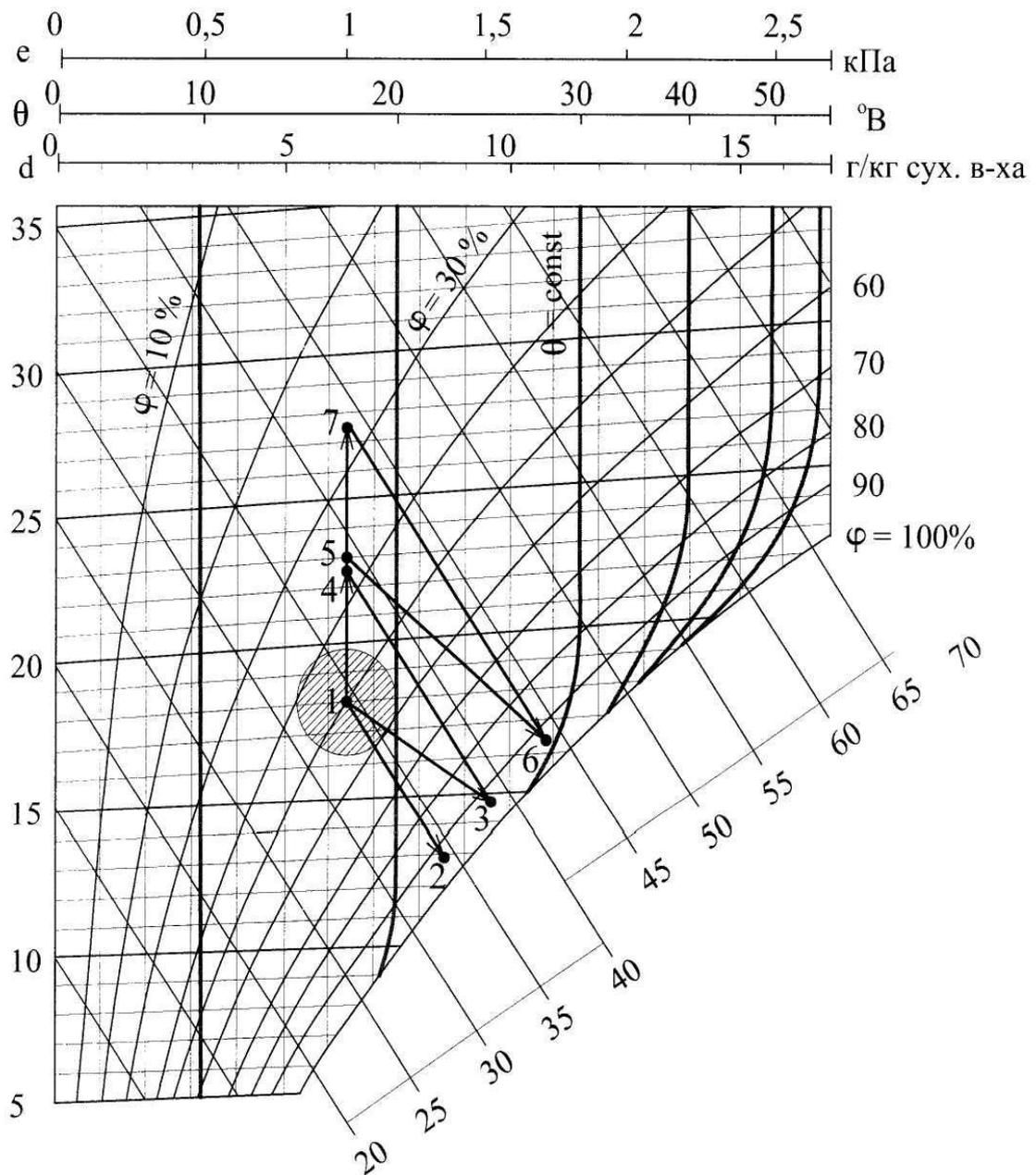


Рис. 4.18. Расчет интенсивности и времени сушки травы на $I-d-\theta$ -диаграмме (см. примечание на стр. 79)

Таким образом, использование солнечного подогрева позволяет уменьшить расход воздуха, продуваемого через слой, и сократить продолжительность процесса сушки на $\Delta\tau = \tau - \tau' = 70,2 - 61,5 = 8,7$ ч.

При ежесуточной 10-часовой продувке продолжительность сушки травы неподогретым воздухом составляет 7 сут., а при использовании солнечного подогрева сокращается, 6 сут.

Пример 4.2. Примем начальные параметры сушильного агента: $t_{\text{в0}} = 24$ °С, $\varphi_{\text{в0}} = 35$ %, $d_{\text{в0}} = 6,5$ г/кг сух. в-ха, $\theta_{\text{в0}} = 16$ °В. Параметры воздуха на выходе из слоя травы: $t_3 = 18$ °С, $\varphi_3 = 90$ %, $d_3 = 11,5$ г/кг сух. в-ха, $\theta_3 = 30$ °В. Удельный расход воздуха $L_{m\rho_{\text{в}}} = 1800$ кг/(ч·т).

Коэффициент массопереноса будет равен:

$$\alpha_{\theta} = 1800(11,5 - 6,5)/(30 - 16) = 643 \text{ г/(т}\cdot\text{ч}\cdot\text{°В)}.$$

Глава 5. Эффективность и технико-экономическое обоснование процессов сушки при заготовке грубых кормов

5.1. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ СУШКИ ТРАВЫ

Эффективность систем активной вентиляции оценивается по сохранности потребительской стоимости ранее созданного продукта, т.е по сохранности питательных качеств скошенной травы в течение осенне-зимнего сезона кормления животных.

При оценке эффективности САВ рассматривают не только их технико-экономические показатели. Техничко-экономические показатели ограничиваются экономическими результатами хранения, а эффективность систем в целом, помимо экономических, включает в себя социальные результаты хозяйственной деятельности. Социальные результаты применительно к сушке травы и хранению сена находят свое выражение в повышении товарности сельскохозяйственного производства, в снижении потерь произведенной продукции, в наличии гарантированного фонда качественных кормов.

Вопросы снижения расхода энергии заставляют искать экономически оправданные решения по поддержанию необходимых температурно-влажностных параметров воздуха, подаваемого в слой, за счет возможно полной утилизации теплоты дыхания растений, совершенствования систем подогрева воздуха, оптимизации режимов работы систем активной вентиляции и других инженерных решений и мероприятий.

Обезвоженные корма из травы (травяная мука и т.п.), заготовленные способом искусственной высокотемпературной сушки, в мировом производстве не превышают 2 %. Это объясняется высокой долей стоимости топлива в общем балансе затрат на производство обезвоженных кормов (от 50 до 80 %), а также большими капитальными вложениями при возведении установок и сложностью эксплуатации агрегатов.

В России объем приготавливаемой травяной муки приближается к 10 млн. т в год. Однако темпы роста сдерживаются стоимостью топлива: для получения 1 т травяной муки из сырья влажностью 80% необходимо сжечь не менее 300...350 кг дизельного топлива. Агрегат АВМ-1,5А при производстве 1,5 т/ч травяной муки расходует до 450 кг/ч топлива. Даже если в хозяйстве работает только один агрегат АВМ-0,65, производящий за сезон 600 т муки, расход дизельного топлива составит 180...210 т, что сравнимо с годовыми потребностями в топливе всего машинно-тракторного парка среднего по размерам хозяйства.

Сушка травы в сушилках горячим газом или перегретым воздухом наиболее эффективна при интенсивном перемешивании частиц в потоке теплоносителя. Она также является дорогим способом заготовки: на испарение из травы 1 т влаги тратится 45...50 кг дизельного топлива. При этом около 80 % топлива приходится именно на процесс сушки.

Для интенсификации искусственной сушки необходимо максимально увеличивать площадь испарения продукции путем резки, механического раздавливания (плющения) и снижения первоначальной влажности травяной массы. При высокотемпературной сушке травы для увеличения выноса влаги от продукции при углублении зоны испарения и создания условий для подтягивания влаги из внутренних слоев материала на его поверхность за счет воздействия градиента потенциала влажности необходимо применение переменного температурного режима. С этой целью часто используют чередование циклов нагрева и охлаждения или дают возможность материалу охладиться при неработающих установках.

С экономической точки зрения сушка горячим газом или перегретым воздухом может быть оправдана только при приготовлении высокопитательных кормов с невысокой первоначальной влажностью и достаточной перевариваемостью.

Заготовка сена с использованием систем активной вентиляции (подвяливание в поле и сушка неподогретым воздухом) по сравнению с естест-

венной полевой сушкой позволяет на 15...20 % увеличить сбор, практически исключив потери листьев и соцветий, сохранить протеин, повысить содержание каротина. Один килограмм сена, высушенного с применением САВ, по питательности равноценен более двум килограммам сена, заготовленного естественной сушкой, себестоимость одной КЕ при этом способе заготовки на 46...50 % ниже. Технология заготовки сена с применением САВ дает возможность полностью механизировать сбор сена, исключает возможность самовозгорания продукции, позволяет быстро освобождать сенокосы от скошенной травяной массы.

Экономическая эффективность сушки провяленной травы атмосферным воздухом с использованием систем активной вентиляции достигается за счет повышения питательной ценности сена (0,52...0,56 КЕ/кг) по сравнению с естественной сушкой (0,3...0,4 КЕ/кг), а также в результате уменьшения механических потерь. Сопоставление эффективности различных способов сушки клеверо-тимофеечной смеси, убранный с одного гектара угодий многолетних трав в условиях Нечерноземной зоны России, полученное в результате обобщения литературных данных, в ценах 2006 г. приведено в табл. 5.1. Из таблицы видно, что сено, высушенное атмосферным воздухом с применением САВ, как по рентабельности, так и по себестоимости превосходит сено естественной сушки и травяную муку.

Т а б л и ц а 5.1

Эффективность сушки клеверо-тимофеечной смеси трав

Способ консервирования	Выход КЕ, т/га	Себестоимость корма, руб/га	Прибыль, руб/га	Рентабельность, %	Себестоимость 1 т КЕ
Сено обычное	1,80	4860	2328	92,0	1406
Сено, высушенное САВ	2,20	5940	3083	107,9	1299
Травяная мука	2,85	12488	5246	75,6	2445

Именно по экономическим соображениям, связанным с расходом дефицитного жидкого топлива или электроэнергии, подогрев воздуха в системах активной вентиляции не получил широкого распространения у нас в стране и за рубежом. Применение нетрадиционных источников теп-

лоты, не связанных с затратой топлива или электрической энергии, не только ускоряет процесс сушки, но и повышает рентабельность технологии заготовки грубых кормов.

Сушка травы в естественных условиях происходит со значительным участием теплоты дыхания. Испарение 1 кг воды за счет самосогревания массы эквивалентно полной потере питательных веществ, содержащихся в 0,8 кг сена. Кажущееся в практических условиях постоянство масс сена естественной и искусственной сушки с применением САВ создает иллюзию экономической выгоды естественной сушки. Однако процесс самосогревания сопровождается резким снижением кормовых свойств продукции.

Сопоставление эффективности сушки травы неподогретым и подогретым воздухом ведется с учетом возрастания эксплуатационных затрат на его подогрев. По биологическим и теплофизическим требованиям применение любой технологии сушки должно обеспечивать окончание процесса за 7...9 календарных дней.

Результаты расчетов климатических характеристик и влагопоглощающей способности наружного воздуха для целей сушки травы с начальной влажностью $\omega_{\text{тр}} < 55 \%$, уложенной в скирду или в хранилище за один прием, неподогретым воздухом за 7...9 суток показали, что температура наружного воздуха должна быть $t_{\text{н}} \geq 16,5...17,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$, а его относительная влажность $\varphi_{\text{н}} \leq 75 \%$.

Анализ обеспеченности климатических условий для сушки травы был проведен на примере Нижегородской области, климат которой характерен для большинства районов Нечерноземной зоны России. Коэффициент обеспеченности температурно-влажностных параметров наружного воздуха в районах, расположенных южнее Нечерноземной зоны, будет выше. Температура $t_{\text{н}}$ и относительная влажность $\varphi_{\text{н}}$ воздуха получены в результате статистической обработки круглосуточных параметров воздуха в июне-июле за 10 лет. Среднемесячные величины $t_{\text{н}}^{\text{М}}$ и $\varphi_{\text{н}}^{\text{М}}$ в этот период

для Нижегородской области составляют при $K_{об} = 0,5$ соответственно 16...18 °С, 86 % [59]. Температура наружного воздуха в течение суток выше 20 °С регистрировалась в 49 % случаев, $\varphi_n < 70$ % наблюдалась в 52 % случаев.

Наиболее благоприятные условия складывались с 11 до 18 ч (7 ч в сутки): $t_n > 20$ °С с $K_{об} = 0,85$; $\varphi_n < 70$ % с $K_{об} > 0,85$. В течение 10 ч в сутки (с 10 до 20 ч) $t_n > 18$ °С и $\varphi_n < 75$ % имели $K_{об} \geq 0,8$. Таким образом, климат Нижегородской области отвечает теплофизическим требованиям, предъявляемым к воздуху как к сушильному агенту. Такие же расчеты проведены при обработке параметров климата Самарской области. Получены аналогичные выводы по параметрам и характеристикам атмосферного воздуха.

5.2. КОЭФФИЦИЕНТ ОБЕСПЕЧЕННОСТИ СОХРАННОСТИ КАЧЕСТВА СЕНА

Ухудшение качества продукции во времени является аддитивным и кумулятивным. Наиболее полно ухудшение качества сохнувшей травы и сена можно оценить обобщенным показателем, комплексно учитывающим основные факторы сохранности питательных свойств сельскохозяйственного сырья – коэффициентом сохранности питательных веществ в процессе сушки травы $\kappa_{об.с}$.

Минимальные биологически оправданные потери питательных веществ при сушке травы из-за дыхания, как было показано в главе 1, не превышают 10 %. С учетом этого максимальное значение коэффициента $\kappa_{об.с}$ равно:

$$\kappa_{об.с} = 0,9 \kappa_{об.к} \kappa_{об.м}, \quad (5.1)$$

где $\kappa_{об.к}$ и $\kappa_{об.м}$ – соответственно, коэффициенты обеспеченности качества скошенной травы и параметров воздуха в период сушки.

Качество скошенной травы одного ботанического состава в оптимальные сроки заготовки не влияет на сохранность питательных веществ в заготовленном сене $\kappa_{об.к} = 1,0$.

Достижимые значения коэффициента $k_{об.м}$ в зависимости от технологической заготовки сена приведены в табл. 5.2. Они получены в результате обобщения отечественных и зарубежных литературных данных и результатов лабораторных и натурных исследований авторов книги при заготовке грубых кормов.

Т а б л и ц а 5.2

Обеспеченность параметров воздуха в период сушки травы

Инженерное оборудование	$k_{об.м}$
Приготовление травяной муки	0,95
Сушка с подогревом и без подогрева атмосферного воздуха	0,85
Естественная сушка в полевых условиях	0,50...0,70

Экономическая оценка повышения коэффициента обеспеченности сохранности питательных веществ в период сушки проводится по выражению:

$$\Delta C_c = m C_{к.е} \Delta k_{об.с}, \quad (5.2)$$

где m – содержание кормовых единиц в 1 кг сена (среднее по Нижегородской области значение $m \approx 0,40$ КЕ);

$C_{к.е}$ – себестоимость одной КЕ, руб., (табл. 5.1).

5.3. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА СПОСОБОВ СУШКИ ТРАВЫ

Сопоставление удельных годовых затрат систем активной вентиляции, использующих для сушки травы подогретый и неподогретый атмосферный воздух, C_v , руб/(т.год), заключается в сравнении удельных годовых затрат на топливо или теплоту для подогрева воздуха \mathcal{E}_t , руб/(т.год), и аналогичных затрат на электроэнергию $\mathcal{E}_{эл}$, руб/(т.год).

Остальные удельные годовые затраты на восстановление основных фондов (B), текущий и капитальный ремонты ($P_t + P_k$), заработную плату (Z) считаются равными для рассматриваемых систем ввиду сопоставимости капитальных вложений в сравниваемые установки САВ, работающие

на неподогретом или подогретом воздухе. Воздухоподогреватели круглогодично используются в основном сельскохозяйственном производстве за исключением сезона заготовки грубых кормов (до 45 дней в году).

Начиная с температуры 40 °С, в траве начинается процесс разложения белков. Поэтому максимально возможная температура приточного воздуха $t_{\text{во}} \leq 40$ °С, и требуемый перегрев воздуха обычно не превышает $\Delta t_{\text{во}} = 10$ °С.

Сопоставление значений удельных годовых эксплуатационных затрат $C_{\text{в}}$ при сушке травы неподогретым и подогретым атмосферным воздухом проведем для луговой травы с начальной влажностью $\omega_{\text{тр}} = 40$ % при ее сушке до кондиционной влажности $\omega_{\text{к}} = 19$ %. Примеры расчетов интенсивности и времени сушки уложенной в скирду травы неподогретым воздухом приведены в главах 3 и 4.

Масса сена кондиционной влажности $G_{\text{с}} = 33$ т, производительность системы активной вентиляции $L_{\text{в}} = 70\,000$ м³/ч, удельная производительность $L_{\text{м}} = 2100$ м³/(т.ч), мощность, потребляемая вентилятором, $N_{\text{в}} = 22$ кВт, полное время работы САВ при неравномерности воздухораспределения в скирде $A = 2$ составляет $\tau = 126$ ч. Результаты расчетов сопоставления удельных эксплуатационных затрат при сушке травы сведены в табл. 5.3 и графически представлены на рис. 5.1 при вариантах неравномерности воздухораспределения $A = 2,0$ (сено уложено в скирду) и $A = 1,25$ (сено уложено в сенохранилище).

Подогрев воздуха на $\Delta t_{\text{во}} = 1$ °С в диапазоне температур 18...30 °С повышает его влагопоглощающую способность на $\Delta d_1 = 0,88$ г/кг сух. в-ха. Перегрев $\Delta t_{\text{во}} = 2,5$ °С соответствует $\Delta d_{2,5} = 2,2$ г/кг сух. в-ха, на $\Delta t_{\text{во}} = 10$ °С – увеличению влагопоглощения до $\Delta d_{10} = 8,8$ г/кг сух. в-ха. При подаче неподогретого воздуха в скирду ($\Delta d_0 = 3,3$ г/кг сух. в-ха) САВ работает $\tau = 126$ ч, при соответствующем перегреве на $\Delta t_{\text{во}}$ время работы установки сокращается: $\tau_{2,5} = 75,6$ ч; $\tau_{7,5} = 42$ ч; $\tau_{10} = 34,4$ ч.

Таблица 5.3

Сопоставление удельных эксплуатационных затрат при сушке травы неподогретым и подогретым воздухом

Показатели	Неподогретый воздух	Перегрев воздуха на $\Delta t_{\text{во}}$, °С			
		2,5	5,0	7,5	10,0
Время работы τ , ч/год	126	75,6	54,1	42	34,4
Затраты на привод вентилятора $\mathcal{E}_{\text{эл.в}}$, руб./(т.год):					
- неподогретый воздух $\mathcal{E}_{\text{эл.в}}^{\text{нв}}$	49,8	-	-	-	-
- подогретый воздух $\mathcal{E}_{\text{эл.в}}^{\text{пв}}$	-	30,0	21,3	16,8	11,1
Расход энергии на подогрев воздуха $Q_{\text{эл.п}}$, кВт.ч/(т.год)	-	133	190	221	241
Затраты на перегрев воздуха электричеством $\mathcal{E}_{\text{эл.п}}$, руб/(т.год)	-	79,8	114,0	132,6	144,6
Удельный расход топлива $10^{-3}G_{\text{т}}$, т/(т.год)	-	14,55	20,8	24,2	26,4
Затраты на топливо $\mathcal{E}_{\text{т}}$, руб/(т.год)	-	117,9	168,6	195,9	213,9
Общие затраты $S_{\text{в}}$, руб/(т.год):					
- сушка неподогретым воздухом	49,8	-	-	-	-
- подогрев электричеством	-	109,8	135,3	149,4	155,7
- подогрев при сжигании топлива	-	147,9	189,9	212,7	225,0

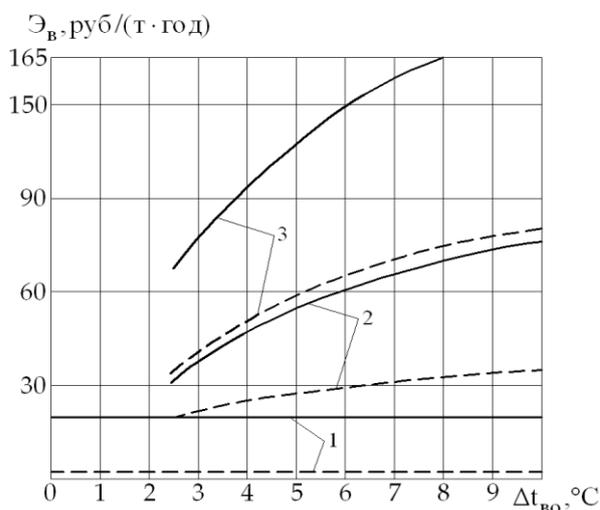


Рис. 5.1. Удельные эксплуатационные затраты на сушку травы: 1 – неподогретый воздух; 2 – подогретый электричеством; 3 – подогрев сжиганием дизтоплива; — — — — — трава уложена в скирду $A = 2,0$); — — — — — трава уложена в сенохранилище ($A = 1,25$)

Удельные годовые затраты на привод вентилятора, руб/(т.год.), составляют:

$$\mathcal{E}_{\text{эл.в}} = \Pi N_{\text{в}} \tau / G_{\text{с}}, \quad (5.3)$$

где Π – стоимость электроэнергии, руб/кВт.ч;

$N_{\text{в}}$ – мощность электродв., кВт;

τ – время работы вентилятора в год, ч;

$G_{\text{с}}$ – масса высушенного сена, т.

Удельный расход энергии при перегреве воздуха электричеством

$Q_{\text{эл.п}}$, кВт/(т.год), и удельные дополнительные затраты на 1 т сена $\mathcal{E}_{\text{эл.п}}$, руб/(т.год), равны:

$$Q_{\text{эл.п}} = c_{\text{в}} \rho_{\text{в}} L_{\text{в}} \Delta t_{\text{в.о}} \tau / 3600 G_{\text{с}}. \quad (5.4)$$

Требуемый для перегрева воздуха удельный расход дизельного или печного топлива G_T , т/(т.год) и сопровождающие сжигание удельные затраты \mathcal{E}_T , руб./ (т.год), определяются по формулам:

$$G_T = Q_{эл.п} 10^{-3} / Q_H^p \eta_{уст}; \quad \mathcal{E}_T = P_T G_T, \quad (5.5)$$

где $Q_H^p = 41\,160$ кДж/кг = 11,43 кВт.ч/кг – теплота сгорания топлива;

$\eta_{уст}$ – КПД установки, $\eta_{уст} \cong 0,8$;

P_T – стоимость топлива, $P_T = 8100$ руб/т (цены 2006 г.).

Анализ результатов сопоставления удельных эксплуатационных затрат при различных способах сушки травы, приведенных в табл. 5.3, показывает, что величина удельных общих затрат C_v , руб./ (т.год), минимальна при неподогретом воздухе. Затраты уменьшаются по мере увеличения равномерности воздухораспределения в слое сохнувшей травы (уменьшения коэффициента A). Наименее выгоден подогрев наружного воздуха при непосредственном сжигании дизтоплива: $\Delta C_{в.эл} = (\mathcal{E}_{эл.п} - \mathcal{E}_{эл.в}^{н.в}) < \Delta C_{в.т} = (\mathcal{E}_{эл.п} - \mathcal{E}_{эл.в}^{н.в})$.

Удельные приведенные затраты при работе систем активной вентиляции на неподогретом воздухе ниже как за счет уменьшения эксплуатационных затрат, так и из-за отсутствия капитальных вложений на оборудование для подогрева воздуха.

Цикличность работы САВ в течение суток, чередование периодов активной сушки неподогретым воздухом с периодами отлежки травы без вентиляции, обеспечивающих подтягивание влаги из внутренних слоев травы на их поверхность за счет внутреннего градиента влажности, способствует интенсификации процесса сушки по сравнению с непрерывной сушкой.

Постоянно действующие биологические тепловыделения травы при ее продувке неподогретым атмосферным воздухом в период затяжных дождей ($\varphi_{во} = \varphi_n - \Delta\varphi_v = (98...100 \%) - 6 \% = 92...94 \%$) позволяют довести влажность травы до равновесной с воздухом $\varphi_{во} = 92...94 \%$, т.е. до $\omega_p =$

32...37 %. Активные биологические процессы в траве при такой влажности прекращаются, и она может храниться дополнительно до 10...15 сут. без заметного ухудшения кормовых качеств в результате микробиологической порчи. Таким образом, общее время сушки удлиняется в 2,0...2,5 раза, в течение которого имеется возможность досушить траву до кондиционной влажности атмосферным воздухом в период отсутствия дождей.

Проанализированные выше данные по экономии энергии при применении систем активной вентиляции, работающих на неподогретом атмосферном воздухе, не учитывают тот факт, что одновременно повышается качество сена. Приведем пример расчета годового экономического эффекта от внедрения САВ за счет повышения качества сена в хозяйстве «Зубилихинский» Краснобаковского района Нижегородской области. Расчет выполнен по «Методике определения экономической эффективности использования в сельском хозяйстве научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, новой техники, изобретений и рационализаторских предложений».

Годовой экономический эффект, руб., определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_1 = (Q_1 - Q_2)E_n, \quad (5.6)$$

где Q_1 – стоимость количества реализованной продукции после внедрения;
 Q_2 – стоимость количества реализованной продукции до внедрения;

Общее количество сена, заготовленного методом активного вентилирования, составило $G_c = 180$ т.

По данным агрохимической лаборатории НИПТИ АПК (г. Нижний Новгород) содержание кормовых единиц в 1 кг сена (из злаковых трав) составило 0,55. Общее количество кормовых единиц $G_{к.е} = 0,55 G_c = 180 \cdot 10^3 = 99\,000$ кг. При стоимости 1 кормовой единицы $\Pi = 7,8$ руб. (2006 г.) $Q_1 = \Pi G_{к.е} = 7,8 \cdot 99\,000 = 772\,200$ руб.

Среднее по хозяйствам района содержание кормовых единиц в 1 кг сена равно 0,43. Тогда $Q_2 = 0,43 \Pi G_c = 0,43 \cdot 7,8 \cdot 180\,000 = 603\,720$ руб.

По формуле (5.6) находим:

$$\mathcal{E}_1 = (772\,200 - 603\,720) \cdot 0,75 = 126\,360 \text{ руб.}$$

В пересчете на 1 т заготовленного сена удельный годовой экономический эффект равен

$$\mathcal{E}_r^{уд} = \mathcal{E}_r / G_c = 126360 / 180 = 702 \text{ руб/т.}$$

5.4. КОНТРОЛЬ ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУХА ПРИ СУШКЕ ТРАВЫ И ЭКСПЛУАТАЦИИ СИСТЕМ АКТИВНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ

Контроль температурно-влажностных параметров поступающего в слой травы воздуха в процессе сушки должен вестись не менее двух раз в день, а при хранении – не реже двух раз в месяц с фиксацией результатов замеров в журнале.

Окончание процесса сушки можно определять косвенным путем по температуре воздуха, выходящего из слоя сена. Она при включении САВ после перерыва в работе не менее 6...8 ч не должна превышать температуру наружного воздуха. При этом должен учитываться такой обязательный показатель окончания процесса сушки, как примерное равенство на входе и выходе относительной влажности продуваемого через сено воздуха.

Одна из форм нормирования расходов воздуха заключается в поддержании скорости фильтрации воздуха в слое сена в пределах от 0,06 до 0,2 м/с. Однако такой метод нормирования применим только к САВ сенохранилищ с решетчатыми полами.

Производительность САВ определяется с помощью следующего комплекта контрольно-измерительной аппаратуры: микроманометра ММН или ЦАГИ с пневмометрической трубкой, анемометра чашечного или крыльчатого, секундомера, термометра, тахометра, метра складного. При наличии желательно использовать современные электронные термоанемометры различных модификаций вместо ручных микроманометров ММН или ЦАГИ, а также термовлагушпы.

Расход воздуха L , м³/ч, определяется с помощью комплекта микрома-

нометра и пневмометрической трубки:

$$L = Fv_{\text{cp}} 3600, \quad (5.7)$$

где F – поперечное сечение воздуховода, м^2 ;

v_{cp} – средняя скорость воздуха в воздуховоде, м/с .

Средняя скорость воздуха равна:

$$v_{\text{cp}} = 14\sqrt{p_{\text{д}}/\rho_{\text{в}}}, \quad (5.8)$$

где $p_{\text{д}}$ – среднее динамическое давление, Па ;

$\rho_{\text{в}} = 353/(273 + t)$ – плотность воздуха, зависящая от температуры, кг/м^3 .

Пневмометрические трубки с микроманометрами применяются при измерении скоростей воздуха в воздуховодах более 3...4 м/с . Изменение угла наклона трубки микроманометра достигается поворотом резервуара. С уменьшением угла наклона трубки точность замеров увеличивается. Микроманометром типа ЦАГИ могут измеряться давления до 1000 Па , микроманометром типа ММН – до 2 000 (2 500) Па .

С помощью микроманометра средняя скорость воздуха определяется в следующей последовательности по зависимости $v = 14\sqrt{p_{\text{д}}/\rho_{\text{в}}}$. Среднее динамическое давление в воздуховоде $p_{\text{д}}$, Па , находится по значениям динамических давлений в каждой из точек замеров $p_{\text{дн}} = 10 h_{\text{д}}K_1$. Здесь $h_{\text{д}}$ – отсчет по микроманометру, мм ; $K_1 = \rho_{\text{ж}} \sin \alpha$ – постоянная прибора, значения которой нанесены на стойке микроманометра.

Схемы присоединения пневмометрических трубок к микроманометрам приведены на рис. 5.2 при измерении давлений во всасывающем A и нагнетательном воздуховоде B . При определении полного давления присоединение осуществляется по схеме III , замеры статического давления осуществляются по схеме II , а динамического давления – по схеме I .

Определять расход следует на достаточно ровном прямом участке воздуховода, длина которого должна быть не менее четырех – пяти диаметров воздухопроводов после местного сопротивления и не менее двух диаметров от точки замера до последующего по движению воздуха местного сопротив-

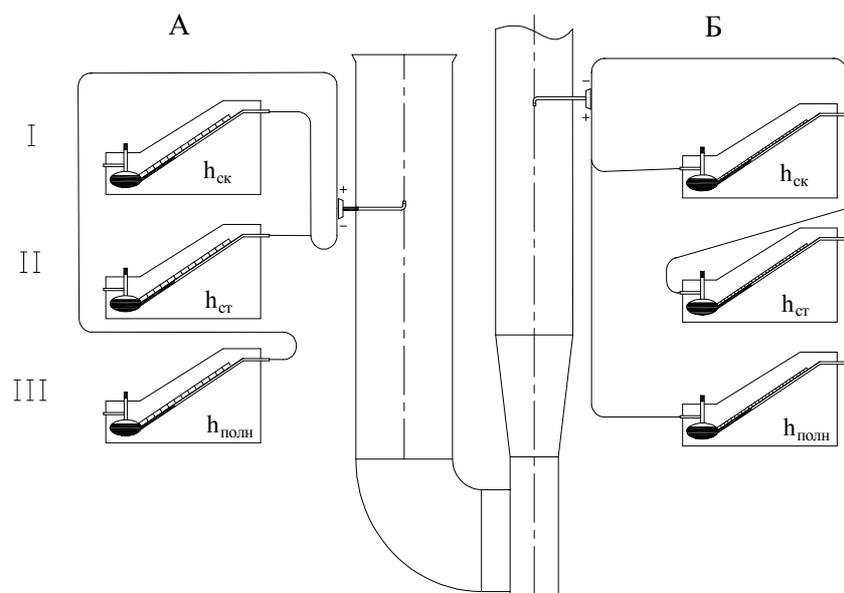


Рис. 5.2. Схемы присоединения пневмометрической трубки к микроманометру

ления. Число измерений, необходимое для определения средней скорости воздуха, принимается в зависимости от диаметра круглого воздуховода или размера стороны прямоугольного воздуховода. Оно колеблется от 6 измерений при диаметре воздуховода или размера стороны менее или равной 350 мм до 16 измерений при диаметре воздуховода 900...1 000 мм. На каждые 100 мм диаметра воздуховода свыше 1 000 мм добавляется одно измерение.

В каждом равновеликом кольце (рис. 5.3) должны быть четыре точки измерения скоростей, лежащие на окружности и делящие площадь кольца на равновеликие части. Расстояние точек замеров от центра воздуховода r_n может быть определено по формуле:

$$r_n = R_o \sqrt{(2n - 1) / 2m}, \quad (5.9)$$

где R_o – радиус воздуховода, мм;

n – порядковый номер отсчета от центра воздуховода;

m – число колец, на которое разбит воздуховод.

Пример определения расстояний при трех равновеликих кольцах приведен на рис. 5.3.

Для определения скоростей в прямоугольных воздуховодах площадь

сечения их $A \times B$ разбивается на несколько равновеликих площадок $a \times b$ (рис. 5.4). Форма площадок должна быть близкой к квадрату, и число пло-

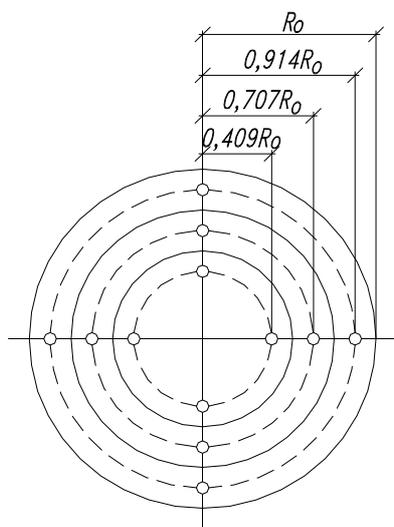


Рис. 5.3. Точки замеров при трех равновеликих кольцах в круглых воздуховодах

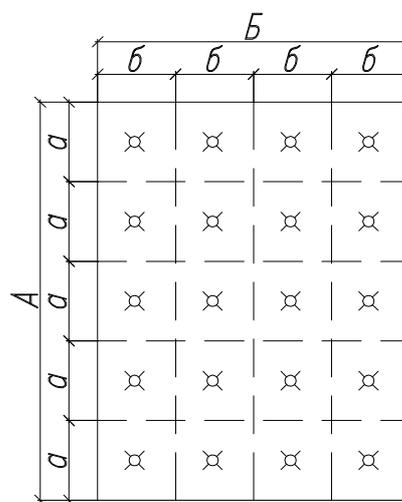


Рис. 5.4. Точки замеров в прямоугольных воздуховодах

щадок не менее девяти при размере каждой площадки не более $0,05 \text{ м}^2$. Скорость определяется в центре каждой площадки.

Среднее значение динамического давления, замеренного в сечении воздуховода, определяется как среднегеометрическое по формуле:

$$p_d = (\sqrt{p_{d1}} + \sqrt{p_{d2}} + \dots + \sqrt{p_{dn}})^2 / n. \quad (5.10)$$

Здесь $p_{d1}, p_{d2}, \dots, p_{dn}$ – значения динамических давлений, замеренных по отдельным точкам площади сечения; n – число точек замеров.

Усредненные значения полных и статических давлений, замеренных в сечении воздуховода, определяются как среднеарифметические из значений давления по каждой из точек замеров.

Скорость воздуха в воздуховодах можно также замерять анемометрами. Анемометры, применяемые при определении эффективности систем вентиляции, бывают механические (крыльчатые и чашечные) и электрические (термоанемометры) различных модификаций.

Крыльчатый анемометр АСО-3 предназначен для измерения скорости движения воздуха в пределах $0,2 \dots 5,0 \text{ м/с}$, осредненной за определен-

ный промежуток времени. Прибор состоит из корпуса (обечайки), внутри которого размещена крыльчатка, насаженная на ось. Под действием воздушного потока крыльчатка вращается. Число оборотов крыльчатки измеряется счетным механизмом.

Чашечный анемометр МС-13 предназначен для измерения средней скорости движения воздуха от 1 до 20 м/с. Конструктивно чашечный анемометр принципиально не отличается от крыльчатого анемометра.

Перед измерением скорости воздушного потока отключается счетное устройство и записывается начальное показание счетчика. После этого анемометр вносят в воздушный поток так, чтобы ось крыльчатого анемометра располагалась параллельно воздушному потоку, ось чашечного анемометра должна быть перпендикулярна направлению движения воздуха. Отклонение от указанных положений не должно превышать $12...15^\circ$. Через $5...10$ с после внесения анемометра в поток одновременно включаются счетное устройство анемометра и секундомер. По истечении $\tau = 30...100$ с механизм и секундомер выключают и записывают конечное показание счетчика и длительность измерения. Продолжительность отсчета следует принимать не менее 30 с. Делением разности конечного N_2 и начального N_1 показаний счетного механизма на время измерения определяют число делений, приходящихся на 1 с:

$$n = (N_2 - N_1) / \tau. \quad (5.11)$$

Скорость движения воздушного потока v определяется по прилагаемому к прибору графику по значениям n .

Термоанемометры являются переносными приборами, предназначенными для одновременного измерения скорости воздушного потока и его температуры. В зависимости от модели прибора можно измерять скорости воздушного потока в пределах от 0,1 до 10,0 м/с. Диапазон измерения температуры воздуха лежит в пределах от 0 до 50°C . Питание прибора в зависимости от модели может осуществляться от сети переменного тока, от аккумуляторов или от батарей. Термоанемометры работают по принци-

пу измерения охлаждения датчиков движущимся воздушным потоком. Электрический ток, проходящий по датчикам, регулируется таким образом, чтобы датчики перегревались при скорости воздушного потока, равной нулю, на постоянную величину по отношению к температуре измеряемого воздушного потока. Например, измеритель комбинированный ТАММ-20 предназначен для измерения разности давлений воздуха, скорости воздушного потока и температуры воздуха при инвентаризации систем вентиляции и кондиционирования воздуха. Диапазон измерения скорости воздуха составляет 0,05...20 м/с, диапазон измерения температуры воздуха лежит в пределах от 0 до 100 °С.

Для измерения частоты вращения вентиляторов и электродвигателей служат тахометры, например ТЧ-10-р, ИО-10, ИО-30 и др.

Для сельскохозяйственных зданий, в которых параметры микроклимата оказывают существенное влияние на качество продукции, продуктивность и условия труда, в базовом методе расчета показателей эффективности применения систем кондиционирования воздуха должна учитываться надежность работы систем. Оценка эффективности действия систем вентиляции, находящейся в эксплуатации, осуществляется по температурно-влажностным параметрам воздушной среды в помещении, а в овощехранилищах – дополнительно в насыпи продукции.

Испытаниям предшествует предварительное обследование и осмотр вентиляционных устройств по выявлению их соответствия проекту и наличию строительно-монтажных дефектов. При осмотре вентиляционных устройств необходимо проверить:

- по воздуховодам, магистральным и воздухораспределительным каналам – соответствие проекту трассировок и сечений для прохода воздуха, плотность воздуховодов и их соединений;

- по регулирующим устройствам – соответствие проекту расположения регулирующих устройств, надежность установки устройств на положения «открыто», «закрыто» и промежуточные;

– по вентиляторам – правильность направления вращения и балансировки рабочего колеса, количество приводных клиноременных ремней, натяжение плоскоремennых передач и наличие ограждения, надежность закрепления вентилятора и электродвигателя на фундаменте, степень нагрева обмоток электродвигателя;

– по строительной части приточных камер – соответствие и герметичность ограждений и дверей.

Все выявленные при осмотре дефекты строительно-монтажных работ к началу испытаний вентиляции должны быть устранены.

Регулирование производительности систем активной вентиляции.

Для увеличения производительности установок САВ часто приходится повышать частоту вращения вентиляторов. Расход воздуха $L_{САВ}$, м³/ч, изменяется пропорционально частоте вращения n , об./мин., развиваемое вентилятором давление p , Па, – пропорционально отношению квадратов частот вращения, потребляемая мощность N , кВт, – пропорционально отношению частот вращения в третьей степени [12]:

$$\frac{L_{\phi}}{L_{н}} = \frac{n_{\phi}}{n_{н}}; \quad \frac{p_{\phi}}{p_{н}} = \left(\frac{n_{\phi}}{n_{н}}\right)^2; \quad \frac{N_{\phi}}{N_{н}} = \left(\frac{n_{\phi}}{n_{н}}\right)^3, \quad (5.12)$$

где L_{ϕ} – фактическая производительность САВ;

$L_{н}$ – необходимая увеличенная производительность САВ;

n_{ϕ} – фактическая частота вращения вентилятора;

$n_{н}$ – необходимая частота вращения вентилятора;

p_{ϕ} – фактическое давление, развиваемое вентилятором;

$p_{н}$ – необходимое давление вентилятора;

N_{ϕ} – фактическая мощность, потребляемая вентилятором;

$N_{н}$ – необходимая мощность, потребляемая вентилятором.

Из (5.12) видно, что при удвоении производительности по воздуху системы активной вентиляции, мощность, потребляемая вентилятором, возрастает в восемь раз. Практически целесообразно повышать частоту

ту вращения вентилятора не более, чем на 25...30 %. В этом случае мощность, потребляемая установкой, возрастает в 1,85...2,2 раза. В тех случаях, когда повышение производительности установки не может быть достигнуто увеличением частоты вращения вентилятора по условиям его механической прочности (окружная скорость колеса становится больше допустимой), необходимо произвести замену вентилятора на больший размер (номер) с соответствующей корректировкой частоты вращения.

Температура поступающего в слой травы или сена воздуха измеряется в вентиляционном канале за вентилятором (за воздухонагревателем, при его наличии). Используются спиртовые или ртутные термометры с ценой деления не более 0,1...0,2 °С или рассмотренные выше термоанемометры и термовлажощупы. Для непрерывной регистрации температуры могут применяться термографы (типа М-16А). В зависимости от модификации прибора барабан делает 1 оборот в сутки (суточный термограф) или в неделю (недельный термограф).

Измерение относительной влажности воздуха основано на психрометрическом методе по разности показаний «сухого» и «мокрого» термометров. Наиболее распространенным психрометром такой конструкции является психрометр ПБ-1. При определении относительной влажности следует учитывать, что показания прибора существенно зависят от скорости воздуха, обдувающего «мокрый» термометр. Показания «мокрого» термометра не зависят от скорости обдувающего воздуха, когда скорость более 2,0 м/с. Это свойство использовано в аспирационном психрометре, который снабжен вентилятором. При работе вентилятора воздух обтекает чувствительные части термометров со скоростью более 2,5 м/с.

Если известны показания «сухого» t_c и «мокрого» $t_{м.т}$ термометров, то значения относительной влажности воздуха φ определяются по $I-d$ -диаграмме влажного воздуха или по психрометрической табл.5.4. Последовательность определения значений φ по $I-d$ -диаграмме следующая. Через точку 2

Т а б л и ц а 5.4

Психрометрическая таблица

$t_{\text{М.Т.}} \text{ } ^\circ\text{C}$	Разность показаний «сухого» и «мокрого» термометров ($t_c - t_{\text{М.Т.}}$), $^\circ\text{C}$																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	91	80	67	53	36	18														
2	90	81	69	56	41	24	4													
3	90	79	72	59	45	29	11													
4	91	81	69	62	49	34	17													
5	92	82	71	59	52	23	5													
6	92	83	73	62	49	43	28	12												
7	93	84	75	64	52	38	33	18	1											
8	93	86	77	67	55	42	28	24	8											
9	94	86	78	69	58	46	33	17	14											
10	94	87	80	71	61	50	37	23	7											
11	94	88	81	73	64	53	41	28	13											
12	95	89	82	75	66	56	45	33	19	4										
13	95	90	83	76	68	59	49	38	25	10										
14	95	90	84	78	70	62	52	42	30	16	1									
15	96	91	85	79	72	64	55	45	34	22	8									
16	96	91	86	80	74	67	58	49	39	27	14									
17	96	92	87	82	76	69	61	52	43	32	19	6								
18	96	92	88	83	77	71	63	55	46	36	25	12								
19	97	93	89	84	79	73	66	58	50	40	30	18	5							
20	97	93	89	85	80	74	68	61	53	44	34	23	11							
21	97	94	90	86	81	76	70	63	56	48	38	28	17	4						
22	97	94	91	87	82	77	72	66	59	51	42	33	22	10						
23	97	94	91	87	83	79	73	68	61	54	46	37	27	16	4					
24	98	95	92	88	84	80	75	70	64	57	49	41	32	21	10					
25	98	95	92	88	85	81	77	71	66	59	52	45	36	26	16	4				
26	98	95	93	89	86	82	78	73	68	62	55	48	40	31	21	10				
27	98	96	93	90	87	83	79	75	70	64	58	51	44	35	26	16	4			
28	98	96	93	91	88	84	80	76	72	66	61	54	47	39	31	21	10			
29	98	96	94	91	88	85	82	78	73	68	63	57	50	43	35	26	16	5		
30	98	96	94	92	89	86	83	79	75	70	65	60	53	47	39	30	21	11		
31	98	97	94	92	90	87	84	80	76	72	67	62	56	50	43	35	26	16	6	
32	98	97	95	93	90	88	85	81	78	74	69	64	59	53	46	39	31	22	12	1
33	99	97	95	93	91	88	85	82	79	75	71	66	61	56	49	42	35	26	17	7
34	99	97	95	93	91	89	86	83	80	77	73	68	64	58	52	46	39	31	22	13
35	99	97	96	94	92	90	87	84	81	78	74	70	66	61	55	49	42	35	27	18
36	99	97	96	94	92	90	88	85	82	79	76	72	68	63	58	52	46	39	31	23
37	99	98	96	94	93	91	88	86	83	79	77	74	70	65	60	55	49	43	36	28
38	99	98	96	95	93	91	89	87	84	81	78	75	71	67	63	58	52	46	39	32
39	99	98	96	95	93	92	90	88	85	83	80	76	73	69	65	60	55	49	43	36
40	99	98	97	95	94	92	90	88	86	83	81	78	74	71	67	62	58	52	46	40

на кривой $\varphi = 100\%$ (рис. 5.5), соответствующую температуре $t_2 = t_{м.т.}$, проводится линия постоянной энтальпии воздуха ($I = \text{const}$) до пересечения с изотермой известной температуры «сухого» термометра $t_1 = t_c$ (точка 1). По состоянию воздуха в точке 1 находится действительная относительная влажность воздуха φ_1 и влагосодержание d_1 .

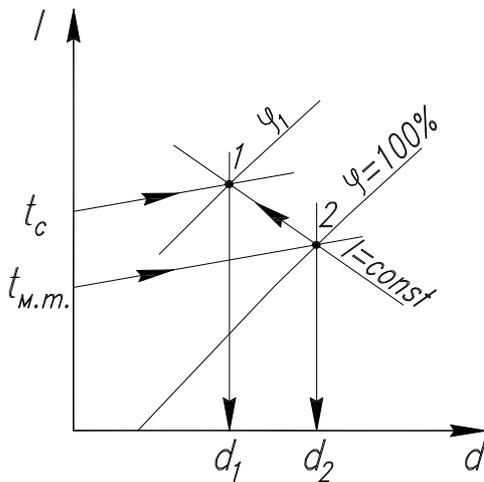


Рис. 5.5. Определение с помощью I-d-диаграммы относительной влажности и влагосодержания воздуха по t_c и $t_{м.т.}$

Самопишущими приборами, предназначенными для непрерывного измерения и записи относительной влажности воздуха, являются гигрографы М-21 и М-32. В зависимости от модификации гигрографы выпускаются недельными и суточными. Чувствительными элементами приборов соответственно являются пучок волос или круглая мембрана, изготовленная из специально обработанной органической пленки.

но обработанной органической пленки.

Измерение температуры, влажности и потенциала влажности травы и хранящегося сена ведется на глубине до 0,8...1,0 м от поверхности слоя. Определение температур по всему объему продукции может осуществляться протарированными термопарами в комплекте с потенциометром. Термопары должны закладываться при формировании скирд или заполнении сеном хранилища.

Влажность травы и сена на практике определяют также по органолептическим качествам продукции (см. главу 2). Применение такого несовершенного, зависящего от вторичных свойств продукции метода, вызвано отсутствием в хозяйствах приборов для определения постоянной регистрации влажности травы и сена. Лабораторный способ определения влажности, основанный на взвешивании материала в процессе удаления из него влаги в сушильных шкафах, трудоемок и продолжителен.

Эксплуатация систем активной вентиляции. Наиболее надежно сохраняется сено при укладке его в сенохранилища, имеющие крыши и деревянные или асфальтированные (бетонные) полы. В них предотвращается увлажнение продукции как атмосферной, так и почвенной влагой. Поэтому отсутствуют основные причины возникновения микробиологической порчи в осенне-зимний период хранения.

Подготовка сенохранилищ к эксплуатации заключается в тщательной очистке от мусора остатков прошлогодней продукции. Особое внимание следует уделить очистке приточных вентиляционных коробов. Все металлические элементы хранилищ при повреждении противокоррозионной защиты подлежат окраске масляной краской в два слоя.

Одновременно проводят возможную реконструкцию, а также обязательную проверку и наладку вентиляционных систем. Тщательно заделывают щели в вентиляционных коробах и каналах, ремонтируют заслонки, шиберы и т.п. Проверяют готовность электрообеспечения работы систем активной вентиляции. Электрооборудование и вентиляторы должны пройти профилактику, техобслуживание в соответствии с требованиями инструкций по эксплуатации и правилам техники безопасности. Особое внимание следует уделить заземлению всех электродвигателей, шкафов, токопроводящих устройств.

Наряду с *обязательными противопожарными мероприятиями* внутри помещений сенохранилищ необходимо учитывать возможность возгорания сена от установок систем активной вентиляции, работающих даже на неподогретом атмосферном воздухе. В работающем вентиляторе может произойти случайное образование искр при трении кромок входного патрубка о колесо. Для предотвращения искрообразования колесо вентилятора желательно изготавливать из мягкого металла (алюминий, латунь, медь). В некоторых случаях внутреннюю поверхность спирали кожуха облицовывают листовым мягким металлом. Входной патрубок вентилятора также можно выполнять из мягкого металла. При применении наиболее распро-

страненных стальных общепромышленных центробежных (радиальных) вентиляторов типов Ц4-70, Ц4-76 или аналогичных для предотвращения возгорания сена расстояние от вентиляторов до ближайших воздухораспределительных отверстий в магистральном канале должно быть не менее 4...5 м. Проходя это расстояние за время около 1 с, искры гаснут или теряют свою энергию, достаточную для воспламенения сена. Те же противопожарные требования предъявляются к системам активной вентиляции, оборудованным общепромышленными стальными осевыми вентиляторами типов МЦ, ОВ 06-320 или аналогичных.

Вентиляторы с электродвигателями располагаются или снаружи сенохранилищ (с защитой электродвигателей от атмосферной влаги) или в отдельных сухих непыльных помещениях.

Размеры противопожарных расстояний от границ площадей, предназначенных для размещения (складирования) открыто хранящихся скирд рассыпного или штабелей прессованного сена до сельскохозяйственных зданий и сооружений, имеющих, как правило, низкую степень огнестойкости, составляют 48 м. При складировании сена в хранилище это расстояние может быть уменьшено в два раза (до 24 м). Расстояние от границ открытых складов до зданий и сооружений с пожаро- или взрывоопасными производствами увеличивается до 60 м. Расстояние от границ площадок открытого хранения рассыпного или прессованного сена до границы леса следует принимать не менее 100 м.

Оценивая эффективность приведенных выше противопожарных расстояний от границ складов или площадок открытого хранения сена, соломы или других волокнистых материалов органического происхождения до производственных сельскохозяйственных зданий, можно говорить о их правомерности для предотвращения распространения пожара только при отсутствии ветра, т.е. от действия только лучистой составляющей переноса энергии. На практике из-за наличия ветра постоянно наблюдается массовый перенос искр и тлеющих хлопьев при горении сена и соломы на зна-

чительные расстояния с запасом энергии, достаточным для поджигания сгораемых материалов. Поэтому необходимо площадки для открытого хранения сена и соломы размещать с подветренной стороны по отношению к гражданским и промышленным сельскохозяйственным зданиям с учетом направления господствующих ветров. В тех случаях, когда это правило невыполнимо, следует величины минимальных значений противопожарных расстояний от открытых складов, как минимум, удваивать.

Рекомендуется скирды рассыпного и прессованного сена располагать параллельно направлению господствующих ветров.

Заключение

Комплексная механизация производства грубых кормов заключается в переводе на промышленную основу процесса сушки травы. Цикл заготовки грубых кормов должен осуществляться в оптимальные или допустимые по биологическим требованиям сроки уборки, быть законченным технологически с точки зрения механизации, обслуживаться квалифицированными специалистами. При сушке травы обязателен учет ботанических, питательных, физико-механических, теплофизических и аэродинамических характеристик рассыпного и прессованного сена, сохнущей травы. Разработанные и рекомендуемые технологии заготовки грубых кормов позволяют снизить до допустимого минимального уровня как механические потери продукции, так и потери питательных веществ.

Проведен анализ основных биологических и теплофизических характеристик сохнущей травы и сена, существующих методов расчета влагоотдачи сохнущей травой, устройств полевых и стационарных систем активной вентиляции. В результате сделан вывод о неприемлемости психрометрической теории массообмена при сушке биологически активной продукции (травы).

В книге научно обоснована, разработана и подтверждена в лабора-

торных и практических натуральных условиях на примере сушки травы теплофизическая модель тепломассообмена в биологически активных средах. Предложенная теплофизическая модель процессов сушки учитывает периодичность циклов естественной и вынужденной конвекции, климатические параметры наружного воздуха. Получены количественные показатели коэффициентов обеспеченности параметров наружного воздуха как сушильного агента для различных климатических регионов страны.

На основе разработанной авторами теплофизической модели процессов обработки воздуха на $I-d$ -диаграмме влажного воздуха предложена методика графо-аналитического расчета интенсивности влагообмена в слое сохнувшей травы. Впервые выявилась возможность рассчитывать производительность и режимы эксплуатации систем активной вентиляции, работающих как на необработанном атмосферном, так и подогретом искусственно в теплогенераторах или в гелиоустановках воздуха, аналитически рассчитывать и обосновывать конструктивные параметры установок.

Дан анализ теории тепломассопереноса, основанной на понятии потенциала влажности. Получены опытно-аналитические зависимости значений потенциалов влажности при сушке травы. Проведены графоаналитические исследования процессов сушки на основе теории потенциала влажности на $I-d-\theta$ -диаграмме с разработкой методики расчета интенсивности сушки травы. Совместный учет процессов тепло- и влагопереноса при сушке в форме обобщающего термодинамического потенциала (потенциала влажности) представляется удобным в практической деятельности для определения надежности, экономичности и экологичности систем активной вентиляции. Анализ затрат указывает, что в условиях Нечерноземной зоны РФ наибольший экономический эффект достигается при сушке рассыпной травы неподогретым атмосферным воздухом в сенохранилищах при удельном расходе воздуха $L_m = 1200 \dots 1250 \text{ м}^3/(\text{т.ч})$ в одиночно стоящей скирде, сформированной в один день, или в штабеле прессованной травы при $L_m \cong 2500 \text{ м}^3/(\text{т.ч})$. Такие параметры воздухообмена позволя-

ют досушивать травяную массу с начальной влажностью 45...55 % за 4...7 дней при работе САВ с 9 до 18 ч.

Социальный эффект повышения качества заготовки грубых кормов заключается в повышении товарности сельскохозяйственного производства, в наличии гарантированного запаса кормов для животноводства. Снижение расходов теплоты системами активной вентиляции при сушке травы сопровождается положительным экологическим эффектом от уменьшения вредных выбросов в атмосферу.

ПРИЛОЖЕНИЕ

МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЗАГОТОВКИ КОРМОВ

№№ п/п	Наименование	Назначение и условия применения	Производительность
1	Косилка однобрусная навесная КС-Ф-2,1Б, КРН-2,1	Кошение сеяных и естественных трав урожайностью до 30 ц/га	1,2...2,5 га/ч
2	Косилка двухбрусная полунавесная КД-Ф-4,0	Кошение сеяных трав урожайностью до 15 ц/га	3,5 га/ч
3	Косилка трехбрусная прицепная КП-Ф-6,0	Кошение естественных трав урожайностью до 10 ц/га	3,6...5,4 га/ч
4	Косилка-плющилка самоходная Е-303	Скашивание и плющение сеяных трав	3,0 га/ч
5	Косилка-плющилка валковая КПРН-3,0А	Скашивание и плющение сеяных трав с укладкой массы в валок или прокос	4,5 га/ч
6	Косилка-плющилка самоходная КПС-5Б	Скашивание и плющение сеяных трав	4,8 га/ч
7	Косилка-измельчитель: КИР-1,5М КИР-1,85Б	Для скашивания и одновременного измельчения трав, низкостебельчатых культур	1,5 т/ч 1,78 т/ч
8	Самоходный кормоуборочный комбайн КСК-100А	Для скашивания сеяных, естественных трав и высокостебельчатых культур с одновременным измельчением и погрузкой в транспортные средства	кошение трав 36 т/ч кукурузы 90 т/ч
9	Комбайн Е-281С	Скашивание, измельчение и погрузка в транспортные средства сеяных и естественных трав на зеленый корм, сенаж, силос и травяную муку урожайностью до 30 ц/га и более	33...51 т/ч
10	Силосоуборочный комбайн КСС-2,6А	Скашивание на силос кукурузы, подсолнечника и других культур, посеянных сплошным, рядковым или квадратно-гнездовым способом, при высоте стеблей до 4 м, и погрузка массы в транспортные средства	15...27 т/ч
11	Грабли-валкооборачиватели колесно-пальцевые ГВК-6Г	Сгребание сена, скошенной массы сеяных естественных трав из прокосов в валки, а также ворошение и переворачивание валков при естественной сушке сена	3,6 га/ч

12	Грабли поперечные тракторные прицепные ГП-Ф-16	Сгребание в валки скошенной подвяленной или свежей массы трав урожайностью до 10 ц/га	14,4 га/ч
13	Грабли тракторные поперечные ГП-Ф-6	Сгребание в валки сена или свежей травы	5,4 га/ч
14	Грабли-ворошилки ротационные ГВР-6Б	Сгребание сена из прокосов с одновременным высушиванием валка	ворошение - 5,0 га/ч, сгребание - 7,0 га/ч
15	Ворошилка роторная модульная ВРМ-Ф-7,5	Для сгребания травы из прокосов, ворошения травы в прокосах, вспушивания валков, формирования рыхлых валков при сгребании	3...9 га/ч
16	Грабли поперечные конные КГ-1	Сгребание сена из прокосов в валки	1,0 га/ч
17	Волокуши ВНК-11	Транспортировка копен сена или соломы к месту скирдования, уборка сена из валков и образования копен	10 га/ч
18	Пресс-подборщик ППЛ-Ф-1,6М	Подбор сена из валков, прессование его в тюки и связывание шпагатом в двух местах	до 29 т/ч
19	Пресс-подборщик рулонный безременный ПР-Ф-750	Подбор сена из валков и образование копен цилиндрической формы	до 17 т/ч
20	Стогообразователь СПТ-60	Формирование стога массой 5 т	от 12 т/ч до 18 т/ч
21	Прицеп-стоговоз СП-60	Перевозка стогов, сформированных СПТ-60	от 6 т/ч до 12 т/ч
22	Тележка подборщик-тюкоукладчик ГУТ-2,5	Подбор прессованных тюков сена, укладка их на платформу в штабель и транспортирование к месту скирдования	до 5 т/ч
23	Тракторный прицеп-стоговоз ТПС-6	Транспортирование штабелей к месту скирдования и укладка и в скирду	5 т/ч
24	Погрузчик фронтальный ПФ-0,5Б, КУН-10	Скирдование рассыпного и тюкового сена и соломы	2,8 т/ч
25	Установка вентиляционная УВС-10,0; УВС-16,0; УВС-16А	Досушивание сена в скирдах	40...60 тыс. м ³ /ч воздуха
26	Подборщик-полуприцеп :ТП-Ф45 Т-050	Подбор травы, сена, соломы из валков с измельчением или без него, транспортировка, механическая выгрузка	до 18 т/ч 5 т/ч
27	Полуприцеп специальный транспортный ПСТ-Ф-60	Прием и транспортировка измельченной массы кормовых культур	14 т
28	Прицеп-емкость специальная: ПСЕ-Ф-12,5А ПСЕ-Ф-20	Прием и транспортировка измельченной массы кормовых культур	4,2 т 5,5...6,0 т
29	Агрегат универсальный для скирдования соломы и сена УСА-10		22,6 т

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арютов, Б.А. Обоснование и расчет календарных темпов работы и состава технологических звеньев / Б.А. Арютов, А.Н. Важенин, Д.И. Горбунов, А.И. Новожилов, Е.А. Орешин, А.А. Юдинцев // Рекомендации НТС Госагропрома РСФСР. – Горький: ГСХИ, 1990.
2. Беленчук, В.И. Повышение качества сена / В.И. Беленчук. – М.: 1984. – 64 с. (Обзорная информация / ВАСХНИЛ).
3. Биохимическая термодинамика. – М.: Мир, 1982. – 440 с.
4. Благовещенский, Г.В. Сено, сенаж, травяная резка / Г.В. Благовещенский. – М.: Московский рабочий, 1980. – 157 с.
5. Блаус, В.О. Ускоренная сушка грубых кормов / В.О. Блаус, Г.П. Григоренко // Кормопроизводство, 1984, №7. – С. 13...16.
6. Богословский, В.Н. Строительная теплофизика / В.Н. Богословский. – М.: Высшая школа, 1982. – 415 с.
7. Богословский, В.Н. К определению потенциала влажности наружного климата / В.Н. Богословский, Б.В. Абрамов // Сб. трудов МИСИ, 1980, вып. 176. – С. 33...41.
8. Богословский В.Н. Применение потенциала влажности к расчету теплообмена между воздухом и жидкостью / В.Н. Богословский, А.Н. Гвоздков // Водоснабжение и санитарная техника, 1985, №10. – С. 8...9.
9. Бодров, В.И. Закономерности влагообмена в насыпи сочного растительного сырья и в слое сохнувшей травы / В.И. Бодров // Вентиляция и кондиционирование воздуха промышленных и сельскохозяйственных зданий. – Сб. науч. трудов. – Рига: Изд. РПИ, 1987, №19. – С. 20...27.
10. Бодров, В.И. Хранение картофеля и овощей: Инженерные методы создания и поддержания технологического микроклимата / В.И. Бодров – Горький: Волго-Вятское кн. изд., 1985. – 224 с.
11. Бодров, В.И. Заготовка и хранение сена / В.И. Бодров, И.А. Фетисов. – Горький: Волго-Вятское кн. изд., 1988. – 103 с.
12. Бромлей, М.Ф. Гидравлические машины и холодильные установки / М.Ф. Бромлей. – М.: Стройиздат, 1971. – 278 с.
13. Важенин, А.Н. Выбор и обоснование модели прогнозирования сезонного использования техники / А.Н. Важенин, Д.И. Горбунов, А.И. Новожилов, А.А. Юдинцев // Тезисы докладов Всесоюзной науч.-техн. конференции ВАСХНИЛ. – М.: 1984.
14. Важенин, А.Н. Выбор и обоснование модели прогнозирования использования техники на весенних полевых работах / А.Н. Важенин, Д.И. Горбунов, А.А. Юдинцев // Совершенствование методов использования и технического обслуживания машинно-тракторного парка: Сборник научных трудов ГСХИ. – Горький, 1983.

15. Важенин, А.Н. Определение состава и ситуационного использования МТП: Методическое пособие / А.Н. Важенин, Н.Н. Майоров, В.И. Шухрин, А.А. Юдинцев. – Н.Новгород: НижГСХА, 1995.
16. Важенин, А.Н. Эксплуатационные показатели машинно-тракторных агрегатов при выполнении сельскохозяйственных работ. Справочное пособие / А.Н. Важенин, А.В. Пасин, А.А. Юдинцев, А.И. Новожилов. – Н.Новгород: НижГСХА, 2005.
17. Валушис, В.Ю. Основы высокотемпературной сушки кормов / В.Ю. Валушис. – М.: Колос, 1977. – 304 с.
18. Волкинд, И.Л. О теории тепловлажностных процессов в камерах хранения холодильников / И.Л. Волкинд // Холодильная техника, 1980, №11. – С. 41...42.
19. Волков, М.А. Тепло- и массообменные процессы при хранении пищевых продуктов / М.А. Волков. – М.: Легкая промышленность, 1982. – 272 с.
20. Гинзбург, А.С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов / А.С. Гинзбург. – М.: Пищевая промышленность, 1973. – 528 с.
21. Дравининскас, А.М. Механизация заготовки кормов: Опыт хозяйств Литовской ССР / А.М. Дравининскас. – М.: Колос, 1983. – 192 с.
22. Жадан, В.З. Влагообмен в плодоовощехранилищах / В.З. Жадан. – М.: Агропромиздат, 1985. – 197 с.
23. Заготовка прессованного в короткомерные тюки сена с досушиванием принудительным вентилированием: Рекомендации / НИПТИМЭСХ НЗ РСФСР. – Л. – Пушкин, 1982. – 35 с.
24. Козлов, Е.С. Разработка и обоснование рациональных способов сушки травы системами активной вентиляции. Отчет НИР / Е.С. Козлов. – Н. Новгород: ННГАСУ, 1996. – 159 с.
25. Корма. Справочная книга. Под ред. М.А. Смурыгина. – М.: Колос, 1997. – 367 с.
26. Кришер, О. Научные основы техники сушки / О. Кришер. – М.: И. Л., 1961. – 539 с.
27. Кучеренко, М.Н. Термодинамическое обоснование графоаналитического решения задачи влагопереноса в слое биологически активной продукции: Дис.... кандидата технических наук. – Нижний Новгород, 2005. – 138 с.
28. Лыков, А.В. Теория сушки / А.В. Лыков. – М.: Энергия, 1968. – 471 с.
29. Любарский, В.М. Активное вентилирование сельскохозяйственных продуктов / В.М. Любарский. – М.: Колос, 1972. – 152 с.
30. Максимов, Н.А. Краткий курс физиологии растений / Н.А. Максимов. – М.: Гос. издательство сельскохозяйственной литературы, 1958. – 559 с.
31. Мальтри, В. Сушильные установки сельскохозяйственного назначения / В. Мальтри, Э. Петке, В. Шнайдер. – М.: Машиностр., 1979. – 526 с.

32. Насибянец, В.А. Эффективность использования солнечной энергии для сушки травы / В.А. Насибянец // Техника в сельском хозяйстве, 1986, №6. – С. 15.
33. Нестеренко, А.В. Основы термодинамических расчетов вентиляции и кондиционирования воздуха / А.В. Нестеренко. – М.: Высшая школа, 1971. – 459 с.
34. Нэш, М.Дж. Консервирование и хранение сельскохозяйственных продуктов / М.Дж. Нэш. – М.: Колос, 1981. – 311 с.
35. Повышение эффективности использования кормов. – М.: Колос, 1983. – 317 с.
36. Промышленное производство кормов. Справочная книга. – М.: Колос, 1981. – 271 с.
37. Пятрушявичус, В.И. Активное вентилирование травяных кормов / В.И. Пятрушявичус, В.М. Любарский. – Л.: Агропромиздат, 1986. – 96 с.
38. Ребиндер, П.А. Физико-химическая механика / П.А. Ребиндер. – М.: 1958. – 64 с.
39. Савранский, В.М. Механизация сельского хозяйства США / ВНИИТМ сельского хозяйства. ВАСХНИЛ: Обзорная информация // В.М. Савранский, А.Н. Хитров. – М.: 1980. – 60 с.
40. Сакур, В.А. Сушка и активное вентилирование зерна и зеленых кормов / В.А. Сакур. – М.: Колос, 1974. – 216 с.
41. Севернев, М.М. Энергосберегающие технологии в сельском хозяйстве / М.М. Севернев. – М.: Колос, 1992. – 190 с.
42. Сечкин, В.С. Внедрение научных разработок в производство – основа укрепления кормовой базы / В.С. Сечкин // Вестник сельскохозяйственной науки, 1982, №3. – С. 105...109.
43. СНиП 23-01-99*. Строительная климатология.
44. Справочник по кормопроизводству. – М.: Агропромиздат, 1985. – 413 с.
45. Степанова, В.Э. Возобновляемые источники энергии на сельскохозяйственных предприятиях / В.Э. Степанова. – М.: Агропромиздат, 1989. – 112 с.
46. Технология уборки, консервирования и хранения кормов. – М.: Агропромиздат, 1985. – 144 с.
47. Уотсон, С.Дж. Приготовление и использование сена и силоса / С.Дж. Уотсон, М. Дж. – М.: Колос, 1964. – 664 с.
48. Физиология сельскохозяйственных растений. Том III. Физиология водообмена растений. Устойчивость организмов. – М.: Изд-во Московского университета, 1970. – 654 с.
49. Чемшиков, Ю.А. Гелиоустановки для сушки сена / Ю.А. Чемшиков // Научно – технический бюллетень ВАСХНИЛ СО, 1989, т. 5. – С. 9...12.
50. Чижев, Г.Б. Теплофизические процессы в холодильной технологии пищевых продуктов / Г.Б. Чижев. – М.: Пищевая промышленность, 1979. – 271 с.

51. Юдинцев, А.А. Обоснование параметров производственных процессов в растениеводстве / А.А. Юдинцев, Д.И. Горбунов, Е.В. Круглов // Сб. научных трудов «Ситуационное использование сельскохозяйственной техники». – Н.Новгород: НижГСХА, 1997.
52. Чуклин, С.Г. Современные холодильники для хранения фруктов / С.Г. Чуклин, И.Г. Чумак. – Кишинев: Картя Молдаваняске, 1970. – 171 с.
53. Birk G. Erfahrungen mit der Unterdachtrockung von Heu. – Landtechnik, 1956, №2.
54. Chmielewski B. Suszanie i dosuszanie zielonki lakowej. – Wiadomosci melioracyjne i lakazski, 1982, t. 85. – S. 78...81.
55. Feldmann F. Trockung und Beluftung landwirtschaftlicher Produkte. – Landtechnik, 1956, № 2. – S. 78...81.
56. Hak P. La conservation des pommes de terre. – Instituut voor bewaring en verwerking van landbouwprodukten Wageningen, 1975, 282. – P. 1...14.
57. Hearle W.L., Claydon E.C. The Artificial Drying of Baled Hay. – Farm mechanization, 1958, vol. 10. – P. 104.
58. Hendrix T. Heat Generated in Chopped Hay and its Relation to the Drying Effect. – Agricultural Engineering, 1947, №7. – P. 286...288.
59. Holt J. et al. Postharvest quality control strategies for fruit and vegetables. – Agr. Systems, 1983, 10, 1. – P. 21...37.
60. Johansson S. Nya normer for skulltorkarna.– Lantmannen, №7.– P. 17...19.
61. Potke E. Wirtschaftliche Heuwerbung durch Beluftungstrickung. – Technick, Berlin, 1960.
62. Scheuermann A. Die Beluftungstrocknung von Heu. – Landtechnik, 1960, №14.
63. Selger G. Stand der Heubeluftungstechnik. – Landtechnik, 1967, № 8.
64. Tuncer J.K., Wieneke F., Lehmann D. Das Trocknungsverhalten einiger Futtergraser. – Berichte des 3 Kongresses der Europaischen Grunlandvereinigung Futterkonservierung und Grunland, 1969.
65. Vogt C. Silage-und Heuernte durch Lohnunternehmer. – Lohnunternehmen in Land-Forwirtsch, 1981, 36, 5. – S. 272...276.
66. Wilkinson R.H., Hall C.W. Respiration Heat of Harvested Forage. – Transactions of the ASAE, 1966, №3.
67. Winkler B. Fenchtigkeitsgluchgewicht von Luzerne und Wiesengras. – Landt. Forsch, №4, 1954.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{ч}$;
 $K_{об}$ – коэффициент обеспеченности, доли;
 Π – внешняя пористость травы, сена, %;
 c – удельная теплоемкость, $\text{кДж}/(\text{кг} \text{ } ^\circ\text{C})$;
 d – влагосодержание, $\text{г}/\text{кг}$ сух. в-ха;
 F – площадь, м^2 ;
 g_v – удельные выделения углекислого газа, $\text{г CO}_2/(\text{т ч})$; $\text{г CO}_2/(\text{кг ч})$;
 G – масса, кг , т ;
 h – высота, м ;
 I – энтальпия, $\text{кДж}/\text{кг}$;
 j – поток влаги с поверхности материала, $\text{г}/(\text{м}^2\text{ч})$;
 L – расход воздуха, $\text{м}^3/\text{ч}$;
 L_F – удельный расход воздуха по площади, $\text{м}^3/(\text{м}^2\text{ч})$;
 L_m – удельный расход воздуха по массе продукции, $\text{м}^3/(\text{т ч})$;
 n – содержание сухих веществ, %; число случаев отклонения условий от расчетных, шт.;
 N – скорость сушки, $\text{г}/(\text{ч кг}$ сух. в-ха; общее число случаев, шт.;
 p – давление, $\text{кг}/\text{м}^2$, Па ;
 Δp_0 – удельные потери давления, $\text{Па}/\text{м}$;
 q – количество теплоты, Вт ;
 q_v – удельная теплота дыхания, $\text{Вт}/\text{т}$, $\text{Вт}/\text{кг}$;
 Q – явные тепловыделения травы, Вт ;
 r_o – скрытая теплота парообразования, $\text{кДж}/\text{кг}$;
 t, T – температура, $^\circ\text{C}$, K ;
 u – скорость воздуха в слое, $\text{м}/\text{с}$; влагосодержание, $\text{кг}/\text{кг}$ сух. в-ха;
 u_ϕ – фильтрационная (набегающая на слой) скорость воздуха, $\text{м}/\text{с}$;
 V – объем, м^3 ;
 W – количество испаряющейся из травы влаги, кг ;
 α_d – коэффициент влагообмена, $\text{г}/(\text{м}^2\text{ч Па})$;
 α_t – коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2\text{ } ^\circ\text{C})$;
 α_θ – коэффициент влагопереноса, $\text{г}/(\text{м}^2\text{ч } ^\circ\text{В})$;
 ε_t – тепловлажностная характеристика процесса, $\text{кДж}/\text{кг}$, $\text{Вт.ч}/\text{кг}$;
 ε_u – коэффициент испарительной способности травы, доли;
 φ – относительная влажность воздуха, %, доли;
 λ – коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м} \text{ } ^\circ\text{C})$;
 θ – потенциал влажности, $^\circ\text{В}$;
 ρ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$;
 τ – время, ч ;
 ω – влажность, %.

Надстрочечные и подстрочечные надписи

b – барометрический; v – воздух, вентилятор, вентилярование; $v.o$ – подаваемый в слой воздух; $vent$ – вентилятор; vl – влага; $г$ – гигроскопический; d – дождь; $з$ – зона сушки; $к$ – кондиционная, каркас слоя (травы); $м.т$ – мокрый термометр; $н$ – насыпной, наружный; $нас$ – насыщение; $об$ – обеспеченность; $п$ – пар; $п.н$ – пар насыщенный; $пов$ – поверхность; $р$ – равновесный; $с$ – сено, сухой; $с.в.$ – сухое вещество; $с.к$ – сено кондиционное; $сол$ – солома; $ср$ – средний; $тр$ – трава; θ – потенциал влажности.

Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	3
Глава 1. КОРМОВЫЕ, БИОЛОГИЧЕСКИЕ, ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАВЫ И СЕНА.....	5
1.1. Кормовые характеристики травы и сена.....	5
1.2. Краткий обзор технологий заготовки грубых кормов.....	11
1.3. Сокращение потерь при уборке и хранении кормов.....	20
1.4. Биологические показатели травы.....	24
1.5. Физико-механические и теплофизические характеристики травы и сена.....	29
Глава 2. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СУШКИ ТРАВЫ.....	35
2.1. Обзор методов расчета влагоотдачи сохнувшей травой.....	37
2.2. Устройство систем активной вентиляции.....	51
2.2.1. Полевые системы активной вентиляции.....	51
2.2.2. Системы активной вентиляции сенохранилищ.....	54
2.2.3. Устройство и эффективность гелиоустановок для подогрева воздуха при сушке травы.....	58
Глава 3. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ИНТЕНСИВНОСТИ ВЛАГООБМЕНА В СЛОЕ СОХНУЩЕЙ ТРАВЫ.....	67
3.1. Графоаналитическое обоснование расчета интенсивности сушки травы с использованием $I-d$ -диаграммы.....	67
3.2. Построение процессов обработки воздуха на $I-d$ -диаграмме.....	70
3.3. Графоаналитические исследования $I-d-\theta$ -диаграммы влажного воздуха.....	77
3.4. Обеспеченность параметров наружного климата.....	82
Глава 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СУШКИ ТРАВЫ.....	88
4.1. Лабораторные исследования динамики процессов сушки.....	88
4.2. Обобщенные результаты натурных исследований сушки травы.....	92
4.3. Методика расчета интенсивности сушки травы на основе градиента потенциала влажности.....	103
4.4. Построение процессов тепломассопереноса на $I-d-\theta$ -диаграмме.....	110
Глава 5. ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СУШКИ ПРИ ЗАГОТОВКЕ ГРУБЫХ КОРМОВ.....	116
5.1. Эффективность применения систем сушки травы.....	116
5.2. Коэффициент обеспеченности сохранности качества сена.....	120
5.3. Техничко-экономическое обоснование выбора способов сушки травы.....	121
5.4. Контроль температурно-влажностных параметров воздуха при сушке травы и эксплуатации систем активной вентиляции.....	126
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	138
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	141
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	143
УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ.....	147
СОДЕРЖАНИЕ.....	148

Бодров Валерий Иосифович
Бодров Михаил Валерьевич
Кучеренко Мария Николаевна
Юдинцев Андрей Алексеевич

СИСТЕМЫ АКТИВНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ
ДЛЯ СУШКИ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНОГО СЫРЬЯ

Учебное пособие

Редактор
Фетюкова Д. М.