

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
Белорусский национальный технический университет

---

Кафедра «Горные машины»

## **ГОРНОЕ ДЕЛО**

Пособие  
для студентов специальности  
1-36 10 01 «Горные машины и оборудование  
(по направлениям)»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением по образованию  
в области горнодобывающей промышленности*

Минск  
БНТУ  
2021

УДК 622.002.5(075.4)

ББК 33.16я7

Б67

Авторы:

*Н. И. Березовский, В. В. Борисейко,*

*Е. К. Костюкевич, А. Ю. Труш*

Рецензенты:

зав. кафедрой «Теоретическая механика, теория машин и механизмов»

УО «Белорусский государственный аграрный технический университет», д-р техн. наук, профессор *А. Н. Орда*;

главный специалист УТП ГПО «Белтопгаз» *Д. Б. Джелилов*

**Горное** дело: пособие для студентов специальности 1-36 10 01  
Б67 «Горные машины и оборудование (по направлениям)» / Н. И. Березовский [и др.]. – Минск: БНТУ, 2021. – 46 с.  
ISBN 978-985-583-574-6.

В пособии рассмотрены основные типы сушильных установок, сущность процесса сушки, зависимости влагосодержания и скорости сушки от времени, классификация способов сушки. При анализе эффективности сушильных установок подробно рассмотрен расчет материального баланса брикетного завода.

УДК 622.002.5(075.4)

ББК 33.16я7

ISBN 978-985-583-574-6

© Белорусский национальный  
технический университет, 2021

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	4
1. Информационный анализ.....	5
1.1. Сущность процесса сушки. Зависимости влажностендержания и скорости сушки от времени.....	5
1.2. Классификация способов сушки .....	13
1.3. Типы сушилок .....	18
2. Исследование эффективности сушильных установок .....	39
2.1. Материальный баланс брикетного завода .....	39
Библиографический список .....	47

## ВВЕДЕНИЕ

Рациональное использование торфа для получения на его основе широкого спектра продукции с высокими эксплуатационными свойствами становится важной задачей устойчивого развития Республики Беларусь. Фрезерный торф является энергетически ценным местным видом топлива для теплоэлектростанций, исходным сырьем для получения бытового топлива. В нынешних условиях, с учетом возросших цен на газ и уголь и их транспортировку, торф становится вполне конкурентоспособным топливом. Однако добыча торфа, особенно его полевая сушка, сильно зависима от погодных условий, что негативно сказывается на всем технологическом процессе и экономических показателях предприятия. Поэтому снижение зависимости от погодных условий – проблема важная, если не первостепенная, решать которую пытаются по-разному [1].

Сушка торфа – технологический процесс удаления влаги из торфа испарением при его добыче и производстве торфяной продукции. Характеризуется величиной испаряемости – количеством влаги, удаленной с площади за сутки ( $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{сутки}$ ).

Искусственная сушка торфа применяется в торфобрикетном и изоплитном производствах, определяется свойствами сушеного материала и технологическими факторами – температурой, давлением и влагосодержанием сушильного агента.

Производство качественного коммунально-бытового топлива (КБТ) из местных сырьевых ресурсов для нужд малой теплоэнергетики является важнейшим, приоритетным направлением и позволяет решать многие задачи социально-экономического развития:

- снизить зависимость от внешних поставок угля, мазута, печного топлива;
- производить местное КБТ, доступное по цене;
- организовать новые рабочие места;
- снизить отток финансовых средств за пределы РБ;
- использовать современные научно-технические разработки, обеспечивающие технологичность, высокое качество, низкую себестоимость продукции;
- снизить техногенную нагрузку на окружающую среду за счет сокращения загрязняющих выбросов.

# 1. ИНФОРМАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ

## 1.1. Сущность процесса сушки. Зависимости влагосодержания и скорости сушки от времени

Сущность процесса сушки заключается в диффузии влаги из внутренних слоев к поверхности материала и испарении ее на поверхности с переходом в окружающую газообразную среду. Такой процесс может протекать лишь в том случае, если парциальное давление пара в пограничном слое над поверхностью материала больше парциального давления пара окружающей газообразной среды. В тепловых процессах обезвоживания материала рассматривают две задачи – кинетику и статику сушки.

**Кинетика сушки** устанавливает связь между изменением влажности материала во времени и параметрами процесса: свойствами и структурой материала, его размерами, гидродинамическими условиями обтекания материала сушильным агентом и другими факторами. Уравнения кинетики описывают процесс удаления влаги из материала во времени и используются для определения продолжительности и режима сушки.

**Статика сушки** устанавливает связь между начальными и конечными параметрами участвующих в сушке материала и сушильного агента на основе материального и теплового балансов. С помощью зависимостей статики сушки определяют состав материала, расход сушильного агента, тепла и топлива.

Для расчета процесса сушки и создания рациональных конструкций сушилок необходимо совместное рассмотрение кинетики и статики сушки. Механизм сушки влажных материалов определяется в основном формой связи влаги с материалом, а также режимом сушки или условиями испарения влаги с поверхности материала в окружающую среду.

В качестве основной классификации форм связи влаги с материалом обычно принимают схему, где все формы связи де-

ляются на химическую, физико-химическую и физико-механическую. Химически связанная влага обладает наибольшей энергией связи с материалом, находится в точных количественных соотношениях с сухим веществом. Эта влага может быть удалена из материала при температуре выше 120–200 °С, но при этом, как правило, будет изменяться молекулярная структура материала.

К физико-химически связанной влаге относится адсорбционная и осмотическая. Адсорбционно связанная влага удерживается на поверхности коллоидных частиц молекулярными силами. По своим физическим свойствам она отличается от свободной воды. Адсорбция влаги телом сопровождается выделением теплоты. Влага, поглощаемая телом без выделения теплоты, не отличающаяся по своим свойствам от обычной свободной жидкости (воды), называется **осмотически связанной**.

Под физико-механически связанной влагой понимают влагу, находящуюся в микро- (средний радиус капилляра меньше 10–5 см) и макрокапиллярах (с радиусом больше 10–5 см) материала, а также жидкость смачивания. Влага, находящаяся в капиллярах, за исключением адсорбционной, относится к категории свободной. Ее содержание в материале не определяется строго количественными соотношениями. Большинство высушиваемых материалов относятся к капиллярнопористым коллоидным телам, в которых содержится влага всех форм связи.

В технологии сушки влагу, находящуюся в материале, обычно разделяют на два вида: свободную и гигроскопическую. Скорость испарения с поверхности материала свободной влаги определяется по закону испарения ее со свободной поверхности жидкости, а именно при парциальном давлении пара над поверхностью материала (при бесконечно малой скорости сушки), равном давлению насыщения при температуре пограничного слоя, равной температуре поверхности материала.

Если парциальное давление пара в пограничном слое будет меньше давления насыщения, то в этот период удаляется гиг-

роскопическая влага. Она более прочно связана с материалом и удалить ее трудно, а иногда и нецелесообразно. Гигроскопическую влагу  $\omega_r$  материала можно считать границей между свободной влагой и связанной.

В процессе сушки количество влаги в материале уменьшается. Может наступить такое состояние, когда парциальное давление пара в слое газа над поверхностью материала будет равно парциальному давлению пара в окружающей среде, в этот момент наступает равновесное состояние газовых систем в сушильной камере, сушка прекращается. Влажность такого материала  $\omega_p$  называется равновесной.

Однако следует иметь в виду, что если высушенный до такого состояния материал поступает в окружающую среду с постоянными параметрами и парциальным давлением пара большим, чем то, которое поддерживалось в сушильной камере, будет происходить сорбция, то есть поглощение влаги материалом из окружающей среды. Таким образом, в процессе сушки изменяются во времени как влагосодержание и температура тела или материала, так и параметры сушильного агента. Изменение параметров можно представить в виде зависимости от времени (рис. 1.1). Под скоростью сушки понимают изменение влагосодержания материала в единицу времени  $U = dW / dt$ , кг/с, или  $U = d\omega / dt$ , %/с.

При рассмотрении кинетики сушки влагосодержание высушиваемого материала обычно выражают в относительных долях или процентах, то есть отношением изменяющейся во времени массы влаги в теле к абсолютно сухому веществу:

$$\omega_c = (W / G_c) \times 100, \quad (1.1)$$

где  $W$  – количество влаги, находящейся в материале в данное время, кг;

$G_c = G_1 (100 - \omega_1) / 100$  – масса сухого вещества, кг;

$G_1, \omega_1$  – первоначальная масса материала, кг, и начальное влагосодержание, %.

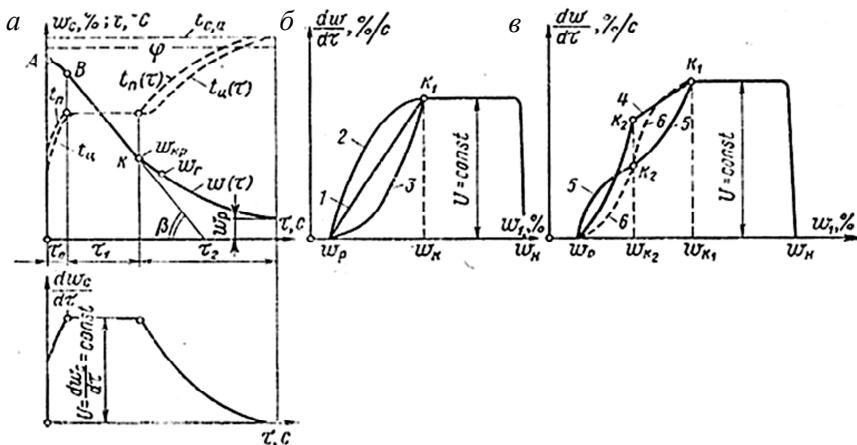


Рис. 1.1. Зависимости влагосодержания и скорости сушки влажных материалов от времени:  
 а – при постоянных параметрах сушильного агента;  
 б, в – типичные и более сложные кривые скорости сушки

Рассмотрим некоторые зависимости влагосодержания, и скорости сушки от времени.

На рис. 1.1, а изображены зависимости сушки  $w_c(\tau)$  и скорости сушки  $dw_c/dt(\tau)$ , которые могут быть получены из опыта при достаточно «мягком» режиме конвективной сушки и постоянных параметрах сушильного агента, а именно температуре  $t_{св}$ , относительной влажности  $\phi$  и скорости потока газа  $v_r$ . В начале процесса убыль влаги из материала происходит медленно (верхний рисунок). В этот сравнительно небольшой промежуток времени  $\tau_0$  температура во всех точках материала увеличивается, а влагосодержание несколько уменьшается. После начальной стадии нагревания влагосодержание материала уменьшается по линейному закону (прямая ВК). Температура на поверхности испарения в течение этого периода сушки  $\tau_1$  не изменяется и равна температуре адиабатического насыщения сушильного агента (температуре мокрого термометра  $t_M$ ). Парциальное давление пара в пограничном слое

равно давлению насыщенного пара  $p_{и} = p_{н}$  при  $t_{пс} = t_{м}$ . Температура поверхности  $t_{п}$  и температура центра  $t_{ц}$  (с запаздыванием) становятся одинаковыми (температурный градиент внутри материала равен нулю:  $dt/dt = 0$ ). Этот период называют периодом постоянной скорости сушки. Он продолжается до достижения критического влагосодержания  $\omega_{кр}$ , начиная с которого температура поверхности материала повышается с течением времени. Температура в центре начинает возрастать с некоторым опозданием. Внутри материала возникает температурный градиент  $dt/dt > 0$ , который уменьшается во времени и становится равным нулю при равновесном состоянии. Сушка прекращается, температура материала становится равной температуре сушильного агента. Второй период сушки называют периодом падающей скорости. Иногда первый период называют периодом постоянной температуры материала,  $t_{м} = \text{const}$ , а второй – периодом повышающейся температуры материала,  $t_{м} = \text{var}$ . Приблизительно (для качественной оценки) численное значение скорости сушки можно определить как тангенс угла  $\beta$  наклона касательной в любой точке кривой. На основании этого допущения методом графического дифференцирования кривой  $\omega_c(\tau)$  строится кривая скорости сушки –  $d\omega_c/dt(\tau)$  (см. рис. 1.1, а, нижний график). В интервале  $\tau_0$  скорость сушки возрастает до некоторого предельного значения в точке В. Угол наклона касательной  $\beta$  в интервале  $\tau_1$  будет неизменным, следовательно,  $-d\omega_0/dt = tq \cdot \beta = \text{const}$  и скорость сушки на графике будет изображаться горизонтальной линией. В интервале  $\tau_2$  при равновесном состоянии газовой системы происходит непрерывное уменьшение скорости сушки до нуля.

Кривые зависимости сушки и скорости сушки от времени для разных по своим физико-химическим свойствам материалов будут иметь разную форму. В процессе сушки влагосодержание материала уменьшается, поэтому при анализе графиков на рис. 1.1, б, в, их необходимо рассматривать (читать) в обратном направлении (справа налево).

В начале процесса скорость сушки резко возрастает до постоянного значения  $d\omega/dt = \text{const}$ , но, начиная с критической точки  $K_1$  она уменьшается по разным законам и при достижении значения  $\omega_p$  становится равной нулю. Простейшей кривой (прямой) в период падающей скорости сушки будет линия 1, проходящая через точки  $K_1$  и  $\omega_p$  (см. рис. 1.1, б). Такой характер изменения скорости будет при сушке тонких волокнистых материалов (бумаги, тонкого картона). Зависимость, выраженная кривой 2, наблюдается при сушке тканей, тонких кож и т. д., кривая 3 соответствует сушке пористых керамических материалов.

У более сложных по структуре влажных материалов во второй период наблюдаются и более сложные зависимости скорости сушки. Например, для глины и других подобных материалов (см. рис. 1.1, в, кривая 4) вначале от точки  $K_1$  до  $K_2$  скорость сушки изменяется по прямой линии, а затем от  $K_2$  до  $\omega_p$  – по кривой, обращенной к оси абсцисс. Для других материалов скорость сушки в этот период может изменяться по линиям 5 и 6.

На графиках, построенных по опытным данным, имеется вторая критическая точка перегиба или перехода  $K_2$ . Влагосодержание, соответствующее этой точке, называется вторым критическим.

Приведенные кривые скорости сушки в основном описывают качественную картину протекания процесса при малых градиентах влагосодержания внутри материала. Более надежные и правильные результаты для анализа периода падающей скорости дают зависимости между температурой материала и его средним влагосодержанием  $t_m(\omega)$  (рис. 1.2). Для варианта а вначале процесса сушки температура центральных слоев возрастает медленнее, чем на поверхности материала, поэтому достигает температуры мокрого термометра  $t_m$  несколько позже. В период постоянной скорости сушки кривые температур для поверхности и центрального слоя совпадают. Градиент

температур при этом исчезает. Начиная с первой критической точки  $K_1$  снова возникает разность температур между поверхностью и центром. Но по мере увеличения температуры материала и приближения процесса ко второй критической точке температуры выравниваются. Дальнейшее повышение температуры материала вплоть до температуры сушильного агента происходит по линейному закону.

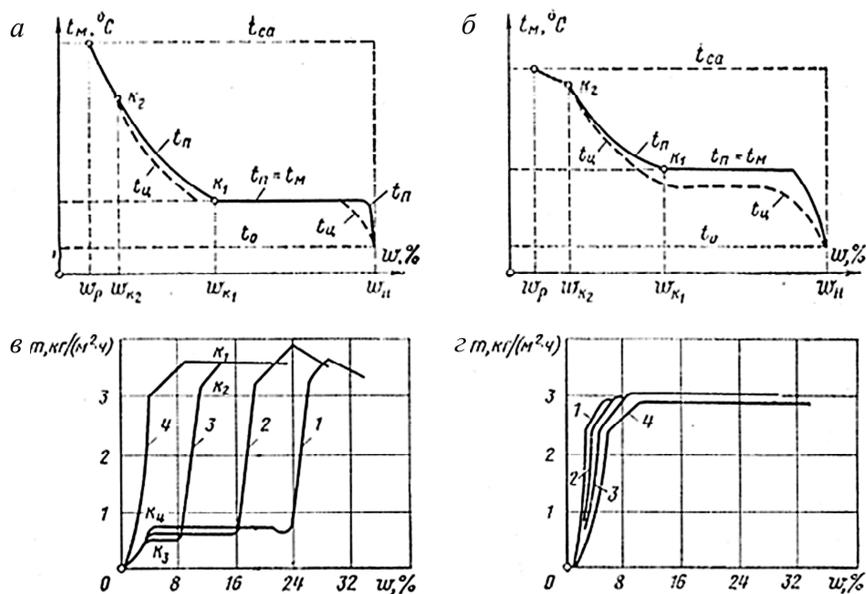


Рис. 1.2. Зависимости температуры и интенсивности сушки от убыли влаги из материала:

*a* – для влажных материалов, которые не дают усадки в первом периоде сушки –  $t_m(\omega)$ ; *б* – для капиллярнопористых материалов  $t_m(\omega)$ ; *в* – для слоя песка, сверху которого насыпан крупный песок,  $m(\omega)$ ; *z* – для слоя песка, сверху которого насыпан мелкий,  $m(\omega)$ ; 1 – 25 % крупного или мелкого песка; 2 – то же 50 %; 3 – то же 75 %; 4 – то же 100 %

Капиллярнопористые тела, мало изменяющие свои размеры в первом периоде, имеют несколько отличающиеся от варианта *a* температурные кривые. С самого начала процесса сушки

до второго критического влагосодержания наблюдается разность температур между поверхностью  $t_{п}$  и центром  $t_{ц}$  (рис. 1.2, б), уменьшающаяся при приближении к точке  $K_2$ . Это происходит потому, что, как в первом, так и во втором периоде сушки, жидкость частично испаряется внутри материала. По опытным температурным кривым с достаточной степенью точности можно установить формы связи влаги с материалом.

Кроме определения различных форм связи влаги с материалом, в том числе и разных видов капиллярной влаги, температурные кривые имеют большое значение для технологии сушки, так как качество выпущенной продукции в значительной степени зависит от температуры материала и длительности ее воздействия.

Следующим показателем, определяющим процесс тепло- и массообмена на поверхности материала, является интенсивность сушки.

*Интенсивность сушки* – количество влаги, удаленной с единицы поверхности материала в виде пара и жидкой фазы в единицу времени  $m$ , кг/(м<sup>2</sup>·ч).

В качестве примера на рис. 1.2, в, г приводится полученная из опыта зависимость интенсивности сушки от влагосодержания песка (графики на рис. 1.2 следует читать справа налево).

Если слой крупного песка насыпать сверху на слой мелкого, то в процессе сушки получают четыре критических точки  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ ,  $K_4$  (рис. 1.2, в). Верхняя часть графика соответствует сушке крупного песка с постоянной скоростью, а следовательно, и интенсивностью до точки  $K_1$ . Затем интенсивность сушки резко уменьшается, что соответствует удалению гигроскопической влаги из крупного песка. В точке  $K_3$  и правее от нее (кривые 1, 2) начинается сушка мелкого песка при постоянной интенсивности, точка  $K_4$  соответствует началу удаления гигроскопической влаги из мелкого песка.

Если же слой мелкого песка насыпать сверху на слой крупного песка, то кривые скорости и интенсивности сушки име-

ют нормальный вид с одним периодом постоянной скорости (рис. 1.2, *з*).

Анализ экспериментальных исследований показывает, что скорость сушки определяется и ограничивается многими факторами, представить которые в виде одной функциональной зависимости практически не представляется возможным.

Отметим наиболее важные из этих факторов. Прежде всего, скорость сушки зависит от природы высушиваемого материала, характера связи влаги с материалом, его структуры, состава и теплофизических свойств. Чем больше отношение поверхности высушиваемого материала к его объему  $F/V$ , чем меньше размеры кусков или зерен, тем быстрее происходит сушка. Существенным образом на длительность сушки влияет и конечное влагосодержание материала, неравномерное удаление влаги из него. Фактор неравномерности сушки зависит от конструкции сушильной камеры, толщины слоя материала и интенсивности его перемешивания, от условий обтекания материала (изделий) сушильным агентом.

Чем выше температура и скорость сушильного агента и чем ниже его относительная влажность, тем быстрее происходит сушка. Однако следует иметь в виду, что температура, относительная влажность и скорость сушильного агента должны быть такими, при которых не изменяются физико-химические свойства, форма и цвет материала и не происходит его унос из сушильной камеры.

## **1.2. Классификация способов сушки**

Сушка – это не только сложный процесс тепло- и массообмена, но также и сложнейший технологический процесс. Высушенный пищевой продукт должен иметь высокие показатели качества, как органолептические, так и физико-химические. Оптимальный режим сушки должен осуществляться при минимальной затрате тепла и энергии и заключаться в макси-

мальном сохранении химико-технологических показателей качества сырья, используемого для сушки.

Исследования последних лет направлены на совершенствование способов сушки, которые бы обеспечивали максимальную сохранность пищевых и вкусовых достоинств продукта, а также высокую эффективность процесса.

Для современных способов сушки характерна интенсификация процессов тепло- и массообмена, которая достигается различными путями: увеличением поверхности контакта между высушиваемым продуктом и сушильным агентом; снижением относительной влажности сушильного агента; применение комбинированного подвода тепла; повышение скорости перемещения высушиваемого материала и сушильного агента; сочетание обезвоживания с различными технологическими процессами: замораживанием, взрыванием, диспергированием, вспениванием и др.

Существует несколько классификаций способов сушки по различным признакам.

**По способу воздействия сушильного агента:**

– естественная – старый способ, используется для сушки плодов, ягод, грибов в регионах с подходящими климатическими условиями. Продукт высушивают на открытом воздухе в тонком слое до равновесной влажности;

– искусственная – проводится в сушильных установках, которые располагают в закрытых помещениях и снабжают необходимыми источниками энергии.

**По давлению воздуха в сушильной камере:**

– атмосферная – сушильным агентом является атмосферный воздух с отклонением давления в сушильной камере не выше 49 МПа;

– вакуумная – сушка производится под вакуумом, который создается и поддерживается вакуум-насосом.

**По способу подвода тепла к влажному материалу сушки:**

– конвективные – тепловая энергия передается конвекцией;

– кондуктивные – тепловая энергия передается с помощью теплопроводности;

– терморрадиационные – тепловая энергия передается с помощью термоизлучения;

– высокочастотные – тепловая энергия преобразуется из электрической внутри высушиваемого материала;

– комбинированные – передача тепла осуществляется с помощью комбинаций вышеупомянутых способов.

**В зависимости от направления движения высушиваемого материала и сушильного агента:**

– прямоточные – направление движения высушиваемого материала и сушильного агента совпадает;

– противоточные – направление движения высушиваемого материала и сушильного агента противоположное;

– перекресточные – направление движения высушиваемого материала и перпендикулярно направлению сушильного агента.

**По виду сушильного агента:**

– аппараты, использующие нагретый воздух;

– установки, использующие дымовые газы;

– установки, используемые смесь воздуха с дымовыми газами;

– установки, используемые перегретый пар.

**По циркуляции сушильного агента:**

– установки с естественной циркуляцией;

– установки с принудительной циркуляцией (при помощи центробежных и осевых вентиляторов).

**По способу нагрева сушильного агента:**

– установки с паровыми калориферами;

– установки с огневыми калориферами;

– установки с топками на жидком топливе;

– установки с топками на газовом топливе.

**По кратности использования сушильного агента:**

– с однократным использованием нагретого воздуха;

– с многократным использованием нагретого воздуха.

**По виду объекта сушки:**

- для твердых материалов (крупных, мелких, пылевидных);
- для жидких материалов;
- для пастообразных продуктов.

**По режиму работы:**

- периодического действия;
- непрерывного действия.

**По конструктивным признакам:**

- тоннельные;
- камерные;
- шахтные;
- ленточные;
- барабанные;
- вальцевые и др.

Выбор способа сушки зависит от биохимических и структурно-механических свойств сырья, состояния его при обезвоживании (целые плоды, нарезанные кусочками, жидкие продукты), а также свойств конечного продукта и экономичности процесса.

*Конвективный способ.* Этот способ самый распространенный. Энергия передается высушиваемому объекту с помощью конвекции. В качестве сушильного агента используется нагретый воздух, топочные газы или перегретый пар. Характерной особенностью конвективной сушки является то, что перенос влаги внутри продукта происходит за счет влаго- и термовлагопроводности как в виде жидкости, так и в виде пара. Сушильный агент является теплоносителем и влагопоглотителем.

Преимуществом этого метода является простота, возможность регулирования температурой высушиваемого материала.

Недостатки. Градиент температуры направлен в сторону, противоположную градиенту влагосодержания, это тормозит удаление влаги из материала. Небольшие коэффициенты теплоотдачи от сушильного агента к поверхности материала  $11,6\text{--}23,2 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ .

Важную роль при конвективной сушке играют параметры сушильного агента (температура, относительная влажность, скорость движения), толщина слоя и его состояние (плотный, разрыхленный, взвешенный, диспергированный), а также удельная нагрузка. Поэтому интенсифицировать конвективную сушку можно, регулируя данные параметры.

*Температура* – с повышением температуры сушильного агента интенсивность испарения влаги увеличивается за счет увеличения теплообмена между высушиваемым материалом и сушильным агентом, а продолжительность сушки сокращается. Однако температура в конце сушки не должна быть выше критической для высушиваемого материала. Для плодово-ягодного сырья она колеблется в пределах 55–65 °С.

*Относительная влажность сушильного агента* – с уменьшением относительной влажности процесс сушки ускоряется. Но сушка с низкой относительной влажностью связана с излишним расходом тепла и, следовательно, удорожанием процесса. Кроме того, низкая относительная влажность сушильного агента вначале сушки способствует быстрому перемещению влаги и образованию корочки на поверхности, что замедляет сушку. Для плодового и овощного сырья относительная влажность отработанного воздуха должна быть в пределах 35–45 %.

*Скорость сушильного агента* – зависит от его количества, поступающего в установку, сечения камеры, направления движения. В тоннельных сушилках скорость движения сушильного агента составляет 2,8–3,5 м/с, а в ленточных – 0,2–0,5 м/с. При движении сушильного агента перпендикулярно высушиваемому материалу теплообмен увеличивается примерно в 2 раза по сравнению с параллельным. Поэтому для сушки в неподвижном слое применение ленточных сушилок более эффективно, чем тоннельных.

*Толщина слоя* – зависит от вида сырья, формы, коллоидно-химических свойств, начальной и конечной влажности. Сушка плодов и овощей в тонком слое в начале процесса и более

толстом в конце создает благоприятные условия для получения продукта хорошего качества и эффективного использования сушильной установки. Этот принцип используется в ленточных сушилках.

*Состояние слоя* – определяет активную поверхность контакта с сушильным агентом.

Использование нагретого воздуха в качестве сушильного агента, который является одновременно теплопередачиком, влагопоглотителем и влагоудалителем, обуславливает сравнительную простоту конструкций конвективных сушилок. При других способах сушки находящийся в контакте с продуктом воздух используется лишь для удаления испарившейся влаги.

Технические способы осуществления конвективной сушки самые разнообразные: в плотном слое, во взвешенном, в распыленном состоянии и т. д.

*Сушка в плотном слое.* Процесс сушки в неподвижном и малоподвижном слое осуществляется в камерных, ленточных, тоннельных и шахтных сушильных установках.

### 1.3. Типы сушилок

Различие сушимых материалов по физико-химическим и структурно-механическим свойствам, форме, размеру, количеству и т. д., способствует применению в промышленности разнообразных конструкций сушильных установок.

Из приведенной ранее классификации сушильных установок наибольшее распространение в промышленности получили конвективные сушилки. Эти установки могут быть разделены на несколько групп по ряду существенных признаков.

#### **По сушильному агенту:**

- а) воздушные;
- б) на дымовых (топочных) газах;
- в) на неконденсирующихся в процессе сушки газах (азот, гелий, перегретый водяной пар и т. д.).

### **По схеме движения сушильного агента:**

а) однозонные (с однократным использованием сушильного агента, с рециркуляцией);

б) многозонные (с промежуточным подогревом сушильного агента, рециркуляцией его по зонам, рециркуляцией между зонами и т. п.).

### **По давлению в сушильной камере:**

а) атмосферные;

б) вакуумные.

### **По направлению движения сушильного агента относительно материала:**

а) прямоточные;

б) противоточные;

в) перекрестно-точные;

г) реверсивные.

Выбор сушильного агента проводят на основе комплексного исследования технико-экономических показателей сушильной установки, ее технологической схемы и связи ее с тепловой схемой предприятия.

Рассмотрим подробно конструкцию всех сушилок данного типа:

## **Ленточная сушилка**

### **I. Многоярусная ленточная сушилка**

В этих сушилках сушка материалов производится непрерывно при атмосферном давлении. В камере 1 сушилки (рис. 1.3) слой высушиваемого материала движется на бесконечной ленте 2, натянутой между ведущим 3 и ведомым 4 барабанами. Влажный материал подается на один конец ленты, а подсушенный удаляется с другого конца.

Сушка осуществляется горячим воздухом или топочными газами, которые движутся противотоком или перекрестным током к направлению движения материала. В одноленточных сушилках со сплошной лентой обычно наблюдается неравномерное высушивание материала: во внутренней части слоя,

обращенной к ленте, конечная влажность выше, чем в его наружной части, омываемой газами или воздухом. Более эффективно применение многоленточных сушилок с лентами из металлической сетки. В них сушильный агент движется перпендикулярно плоскости ленты сквозь находящийся на ней слой материала (перекрестный ток). При пересыпании материала с ленты на ленту увеличивается поверхность его соприкосновения с сушильным агентом, что способствует возрастанию скорости и равномерности сушки. Ленточные сушилки могут работать по различным вариантам сушильного процесса.

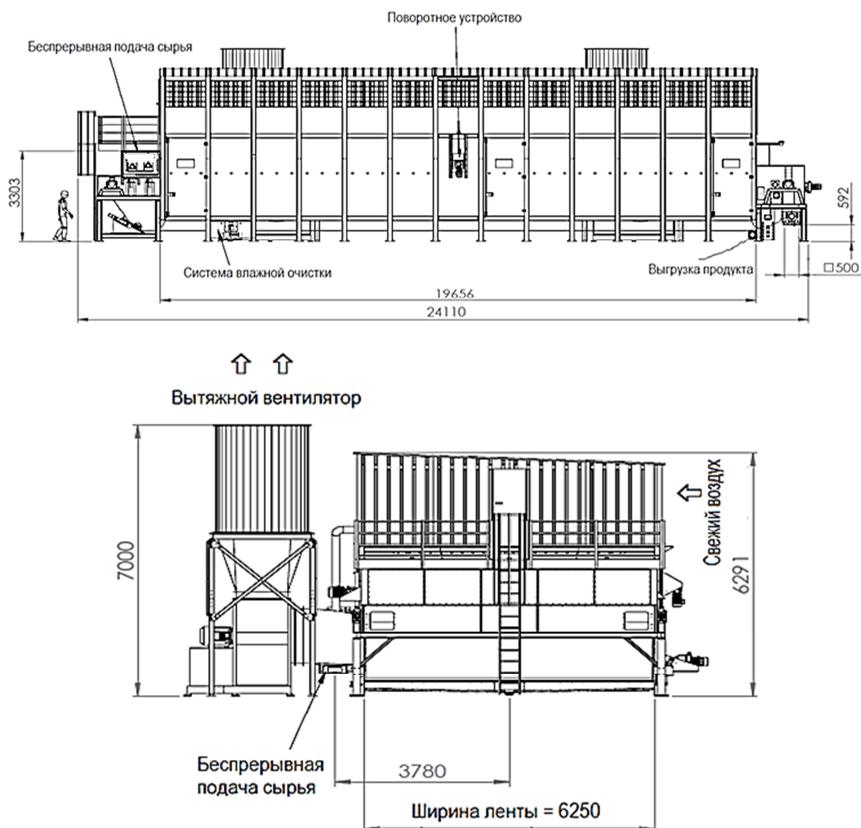


Рис. 1.3. Многоярусная ленточная сушилка

## II. Одноярусная сушильная установка

Такие сушилки предназначены для сушки древесины (щепы, стружки, коры, опилок) и зеленой биомассы (соломы, люцерны, барды и пр.) производительностью 5 т/ч.

Основные технические характеристики одноярусной сушильной установки на 5 т/ч представлены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Среднее время сушки материала	≈ 6–30 минут в активной зоне
Высота слоя материала	варьируется от 70 до 140 мм
Температура сушки	≈ 85 °С
Материал	опилки (россыпью, без пыли, без посторонних материалов, незамороженные, 10 °С)
Производительность по входу	10 т/ч
Производительность по выходу	5 т/ч
Начальная влажность	55 %
Конечная влажность	≈ 10 %
Плотность материала (влажного)	≈ 260 кг/м <sup>3</sup>
Поверхность сушки	≈ 120,9 м <sup>2</sup> (зона обдува горячим воздухом)
Параметры свежего воздуха	температура 10 °С, влажность 70 %, без пыли
Выброс пыли	< 10 мг/м <sup>3</sup>
Занимаемая площадь	см. ниже эскизы
<i>Электрические компоненты</i>	
Вытяжные вентиляторы	2 × 90 кВт
Привод ленты (ковра)	2,2 кВт
Система подачи и распределения	2 × 7,5 кВт
Поворотное устройство	2,2 кВт
Разгрузочный шнек	5,5 кВт
Вентилятор высокого давления для очистки	7,5 кВт
212,4 кВт	

## Барabanная сушилка

Полупневматическая барабанная сушилка (рис. 1.4), способная переработать 24 000 кг/ч опилок и щепы максимальным размером 25×25×3 мм в соответствии с основными техническими характеристиками (табл. 1.2).

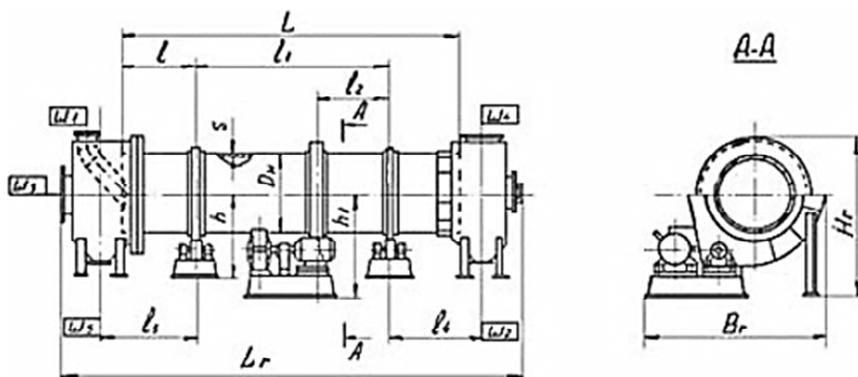


Рис. 1.4. Барабанная сушилка

Таблица 1.2

### Основные технические характеристики сушильной установки

Производительность по входу	24 000 кг/ч
Исходная влажность	55 %
Конечная влажность	10 %
Испаренная влага	12 000 кг/ч
Производительность по сухому сырью	12 000 кг/ч
Сухое сырье, сжигаемое в теплогенераторе (вариант: FDGL)	3000 кг/ч
Сухое сырье для производства пеллет или брикетов	9000 кг/ч
Природный газ, сжигаемый в теплогенераторе (вариант FGDMV)	1000–1300 м <sup>3</sup>
Сухое сырье для производства пеллет или брикетов (вариант FGDMV или при использовании теплогенератора на щепе, коре, опилках)	12 000 кг/ч
Установленная мощность	256 кВт

*Выбросы в атмосферу.* Сушилка оборудована мультициклонной группой для мелких частиц. Выбросы пыли в атмосферу составляют  $150 \text{ мг/нм}^3$ . Так же за отдельную стоимость может быть установлен фильтр, который снизит выбросы до  $20 \text{ мг/нм}^3$ .

*Принцип работы.* Процесс течения воздуха – главное направление сушки. Это позволяет продвигать и перемешивать сырье внутри барабана, получая однородное сухое сырье. Такая редкая характеристика, уникальная для вращающихся машин, позволяет осуществить выгрузку сырья в определенное время.

В результате процесса сушки барабан работает при высокой температуре – когда сырье сырое и при низкой температуре – когда сырье сухое.

### **Сушилки с виброкипящим слоем**

Используемый вибрационный мотор работает плавно и удобен в обслуживании, он отличается малым уровнем шума и длительным сроком службы. Достигается однородное оживленное состояние, без мертвых зон и нарушений процесса, благодаря чему сушка или охлаждение продукта происходят равномерно.

Машина проста в настройке и имеет широкую сферу применения. Густота сырья, скорость подачи сырья в машину и переключение между диапазонами вибрации регулируются плавно и бесступенчато.

Повреждение поверхности сырья минимально, поэтому аппарат может использоваться для обработки хрупкого сырья. Однако эффект процесса не достигается при использовании сырья с ненормативными гранулами.

Конструкция полностью герметична, благодаря чему предотвращается перекрестное загрязнение сырья, а рабочая среда остается чистой.

Высокое механическое и тепловое воздействие, высокая энергоэффективность, по сравнению с обыкновенной сушилкой; расход энергии меньше на 30–60 % (рис. 1.5).

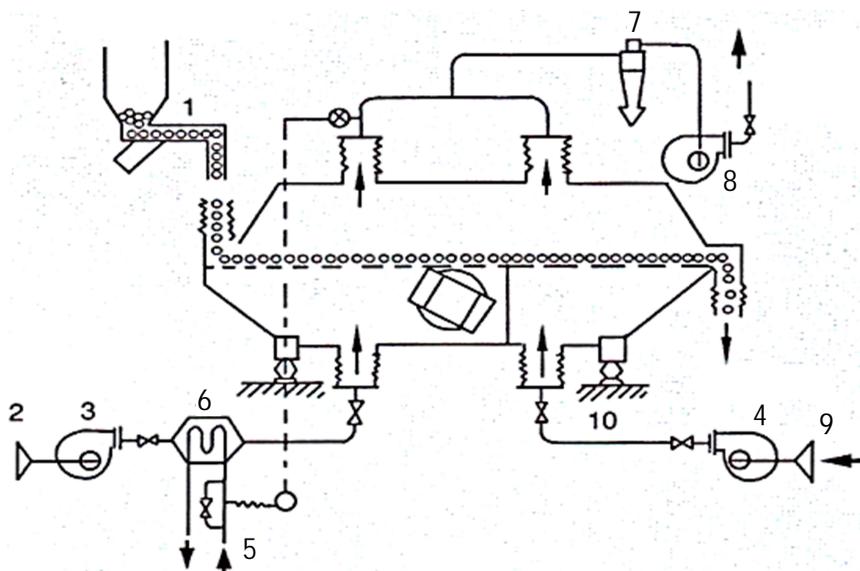


Рис. 1.5. Сушилка с виброкипящим слоем:

- 1 – вибрационный питатель; 2 – фильтр; 3 – нагнетательный вентилятор;  
 4 – нагнетательный вентилятор; 5 – упругая пружина; 6 – теплообменник;  
 7 – циклонный сепаратор; 8 – выхлопной вентилятор; 9 – фильтр;  
 10 – вибрационный мотор

### Туннельные сушилки

Эти сушилки (рис. 1.6) отличаются от камерных тем, что в них соединенные друг с другом вагонетки медленно перемещаются на рельсах вдоль очень длинной камеры прямоугольного сечения (коридора). На входе и выходе коридор имеет герметичные двери, которые одновременно периодически открываются для загрузки и выгрузки материала: вагонетка с высушенным материалом удаляется из камеры, а с противоположного конца в нее поступает новая вагонетка с влажным материалом. Перемещение вагонеток производится с помощью троса и механической лебедки. Сушильный агент движется прямооток или противоток к высушиваемому материалу. Туннельные сушилки обычно работают с частичной рецирку-

лящей сушильного агента, и они используются для сушки больших количеств штучных материалов, например керамических изделий. По интенсивности сушки туннельные сушилки мало отличаются от камерных – им присущи основные недостатки последних (длительная и неравномерная сушка, ручное обслуживание).

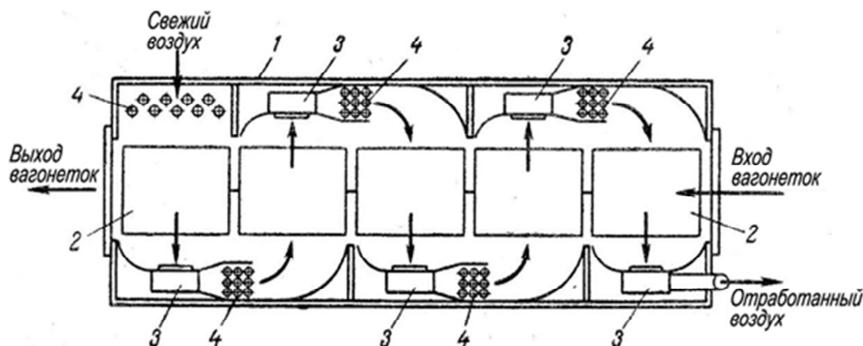


Рис. 1.6. Туннельная сушилка:

1 – камера; 2 – вагонетка; 3 – вентиляторы; 4 – калориферы

### Камерные сушилки

Эти сушилки являются аппаратами периодического действия, работающими при атмосферном давлении. Они используются в производствах небольшого масштаба для материалов, допускающих невысокую (до 250–300 °С) температуру сушки, например, красителей, пищевых продуктов, лекарственных растительных препаратов. Материал в этих сушилках сушится на лотках, установленных на стеллажах или вагонетках, находящихся внутри сушильной камеры 1 (рис. 1.7).

На каркасе камеры между вагонетками 2 установлены козырьки 3, которые как бы делят пространство камеры на три расположенные друг над другом зоны, вдоль которых последовательно движется сушильный агент. Свежий воздух, нагретый в наружном калорифере 4, засасывается вентилятором 5 и подается вниз камеры сушилки. Здесь он движется (путь

воздуха показан на рисунке стрелками), два раза меняя направление и дважды нагреваясь в промежуточных калориферах 6 и 7. Часть отработанного воздуха с помощью шиберов 8 направляется на смешение со свежим воздухом. Таким образом, сушилка работает с промежуточным подогревом и частичной рециркуляцией воздуха, т. е. по варианту, обеспечивающему низкую температуру и более мягкие условия сушки.

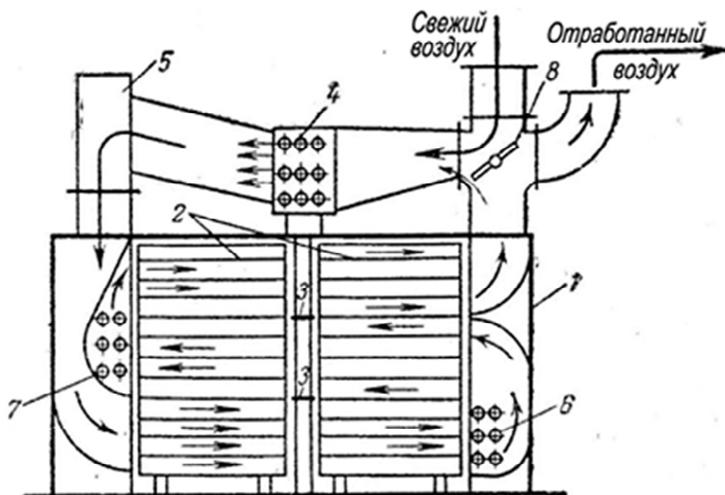


Рис. 1.7. Камерная сушилка:

- 1 – сушильная камера; 2 – вагонетки; 3 – козырьки;  
4, 6, 7 – калориферы; 5 – вентилятор; 8 – шибер

Однако, вследствие сушки в неподвижном толстом слое, сушилки этого типа обладают низкой производительностью и продолжительность сушки в них велика. Кроме того, сушка в них неравномерна из-за неравномерности температур в камере, возникающей за счет частичного прохода воздуха в вышерасположенные зоны кратчайшим путем (через зазоры). Для создания более равномерной циркуляции воздуха в некоторых современных конструкциях камерных сушилок наружный вентилятор заменяют внутренними реверсивными осевы-

ми вентиляторами или применяют эжекторы. В эжекционных камерных сушилках рециркулирующий отработанный воздух подсасывается свежим воздухом, что позволяет уменьшить расход электроэнергии на циркуляцию. Обслуживание камерных сушилок требует больших затрат ручного труда, что также является существенным недостатком

### **Инфракрасная сушка**

На сегодня все предприятия, у которых в процессе обработки, складирования или производства продукции, предусмотрен процесс сушки сырья, материалов, полуфабрикатов или изделий, как правило, единогласно выбирают инфракрасную сушку. Область применения её огромна, а эффективность и преимущества перед традиционными способами очевидны.

С помощью ленточных инфракрасных сушилок туннельного типа (рис. 1.8) можно подвергать сушке длинный перечень самых различных видов продукции, изделий и материалов. Сюда входят:

- зерно, крупы, травы, водоросли, корнеплоды, овощи, фрукты, грибы;
- гранулированные удобрения и комбикорм, топливные брикеты и пеллеты, любая другая брикетированная и гранулированная продукция;
- соль, уголь, щебень, песок, руда, кокс, коксовый брикет, окускованный агломерат, рудная мелочь;
- и еще много всего, включая разнообразные штучные изделия и кусковые материалы.

#### *Особенности и преимущества*

Инфракрасная сушка за счет особенностей технологии дает огромные преимущества перед традиционными способами сушки. Предприятия, использующие оборудование инфракрасной промышленной сушки, значительно сокращают издержки на производство. Так как инфракрасное излучение нагревает непосредственно объекты, а не воздух. Таким образом, существенно сокращается время нагрева, тем самым ускоряется весь

процесс сушки. Благодаря высоким тепловым потокам, способ переноса тепла при помощи инфракрасного излучения увеличивает интенсивность испарения влаги из продукта в несколько раз по сравнению с традиционным конвективным способом. Использование инфракрасного нагрева очень эффективно для сушки тонких слоев. В этом случае интенсификация сушки увеличивается в 1,5–2,0 раза при снижении энергозатрат в 1,5 раза. Вообще, тепловые лучи проникают в толщину продукта до 10–20 мм, нагревая при этом сам продукт и влагу, содержащуюся в нем. Поэтому и процесс нагрева идет в несколько раз интенсивнее, чем при обдуве горячим воздухом, соответственно и вода превращается в пар, очень интенсивно. А предприятия, использующие инфракрасную сушку различной сельхоз продукции, овощей, фруктов, ягод получают дополнительную выгоду в том, что такая продукция сохраняет все свои полезные свойства и вкусовые качества, долго хранится и не портится, так как происходит еще и уничтожение или угнетение различных видов бактерий, что в свою очередь улучшает качество продукта. Воздействие инфракрасных лучей является естественным способом сушки и не оказывает вреда на здоровье человека и окружающую среду.

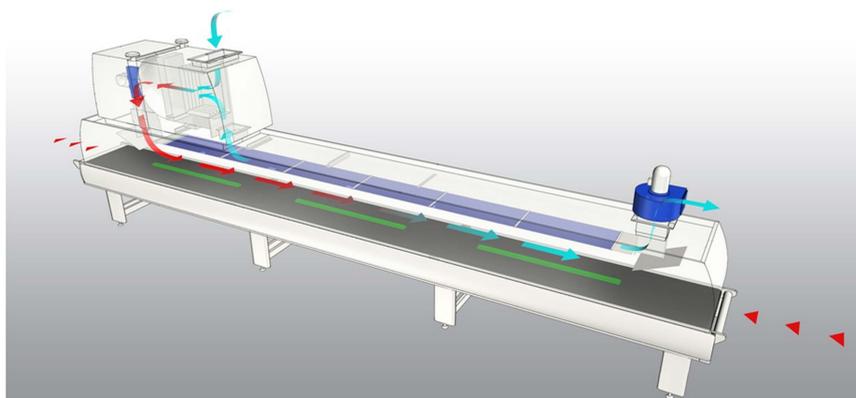


Рис. 1.8. Инфракрасная сушилка

### *Устройство и принцип работы*

В этих сушилках высушиваемый материал движется внутри сушильной камеры по бесконечной ленте (или на нескольких последовательно расположенных лентах), натянутой между ведущим и ведомым барабанами. Нагрев материала, изделий, полуфабрикатов осуществляется керамическими инфракрасными излучателями, расположенными по всей площади рабочей камеры. Процесс сушки ускоряется за счет интенсивного и непрерывного удаления из камеры испаряющейся влаги вытяжными вентиляторами.

#### *Преимущества:*

1) экономичность. При чем это экономия не только затрат электроэнергии при повышенной эффективности. Можно также сэкономить производственные площади при выборе сушиллки исполненной в двух или трех уровнях;

2) высокая эффективность, включающая равномерный нагрев продукции без перегрева и недогрева, и минимизация временных затрат на обработку (высокая скорость). Это достигается использованием высокоэффективных качественных инфракрасных излучателей;

3) экологичность и отсутствие пыли. Ведь в случае, если в продукте присутствует мелкодисперсная фракция, то любой обдув приведет к ее распылению. Здесь с этим справляется вытяжная вентиляция, а экологичность обеспечивает ИК-излучение;

4) пожаробезопасность и высокая управляемость процесса. Нет раскаленных и перегретых деталей и узлов, как при использовании ТЭНов. А контроль и управление происходят через щит управления и современные датчики внутри камеры;

5) невысокая цена оборудования и его быстрая окупаемость.

В настоящее время в торфобрикетной промышленности применяются несколько типов сушилок, использующих в качестве теплоносителя как пар, так и дымовые газы.

Таблица 1.3

## Технические характеристики инфракрасной сушилки

Тип сушилки	СК-1ИК-600	СК-1ИК-1250	СК-1ИК-2000
Тип конвейерной ленты	тефлоновая	тефлоновая	тефлоновая
Категория А	(с яч. 2×2 и 4×4)	(с яч. 2×2 и 4×4)	(с яч. 2×2 и 4×4)
Категория Б	проволочная (12Х18Н10Т)	проволочная (12Х18Н10Т)	проволочная (12Х18Н10Т)
Термопреобразователь	ТХК	ТХК	ТХК
Установленная мощность, кВт	12	24	36
Потребляемая мощность, кВт	5–8	12–18	24–28
Количество излучателей	24	48	72
Число фаз	3	3	3
Напряжение питающей сети, В	380	380	380
Частота переменного тока, Гц	50	50	50
Температура в рабочей зоне, °С	0-250	0-250	0-250
Размер рабочей камеры (Д×Ш×В), мм	4000×700×240	4000×1350×240	4000×2100×240
Ширина конвейерной ленты, мм	625	1250	2000
Скорость движения конвейерной ленты, м/мин	0–5	0–5	0–5
Нагрузка на 1 м погонный конвейерной ленты, кг, не более	50	100	150
Габаритные размеры (Д×Ш×В), мм	5300×1050×1500	5300×1700×1500	5300×2400×1500
Масса, кг, не более	800	1000	1200

Среди паровых сушилок применение получили пневмопароводяные сушильные установки Пеко. Эксплуатируются паровые трубчатые сушилки. Применяются парогазовые барабанные сушилки, основанные на комбинированном использовании отработанного пара и отходящих дымовых газов.

Применение паровых сушилок следует считать оправданным при наличии дешевого отработанного пара районной или собственной электростанции. Комбинированное предприятие с собственной электростанцией позволяет брикетному заводу потреблять здесь же вырабатываемую электрическую энергию и дешевое отработанное тепло, а отходы торфобрикетного производства в виде крупных фракций фрезерного торфа и древесных включений использовать в качестве топлива для ТЭЦ.

При отсутствии дешевых энергоресурсов устанавливать паровые сушилки, а к ним котельные для генерации пара явно нецелесообразно, так как лишняя трансформация тепла неизбежно приводит к потерям и удорожанию процесса сушки. В этом случае неоспоримые преимущества будет иметь пневмогазовая сушка торфа теплом дымовых газов.

На использовании дымовых газов широкое промышленное применение получили трубы-сушилки нескольких модификаций.

### **Паротрубная сушилка «Цемаг»**

Паровая трубчатая сушилка «Цемаг» представляет собой наклонно установленный вращающийся барабан, в днищах которого развальцованы трубки диаметром 100/108 мм. Их количество зависит от диаметра сушилки. Длина барабана для всех сушилок одинакова и равна 8 м. Обычно трубки располагаются по сторонам шестиугольника, что позволяет при данном диаметре барабана разместить наибольшее их количество.

Угол наклона оси сушилки к горизонту зависит от качества сушимого материала и принимается для торфа и бурых углей, равным 8–10.

Скорость вращения сушилки может регулироваться в пределах 4–12 об/мин, в зависимости от влажности и плотности материала.

По оси сушилки в трубные решетки вмонтирована труба большого диаметра, имеющая отверстия для прохода пара в межтрубное пространство. К концам трубы крепятся пустотелые цапфы, которые устанавливаются на два скользящих подшипника и служат опорами сушилки. Для восприятия осевого усилия, возникающего за счет наклонного расположения барабана, задняя цапфа упирается в торцовый упорный подшипник.

Пустотелые цапфы служат для подвода пара и отвода конденсата.

Соединение вращающейся цапфы с паропроводом, который проложен в передней части сушилки, осуществляется сальником, имеющим специальную набивку. Аналогичное соединение имеет задняя цапфа с конденсатопроводом.

Поступающий в межтрубное пространство через переднюю цапфу и внутреннюю трубу пар обогревает трубки сушилки и конденсируется. Образующийся конденсат стекает в нижнюю часть барабана и по наклонной поверхности направляется в водосборники, расположенные у задней торцовой части барабана. При вращении сушилки конденсат через специальные трубки сливается в цапфу, из которой он направляется в конденсатопровод и далее через конденсационный горшок в сборный бак. Для обогрева сушилки используется сухой насыщенный пар давлением до 5 атм.

Во время разогрева сушилки ее длина от термического расширения увеличивается на 8–12 мм. При этом прогрев отдельных узлов происходит неодинаково. Быстрее разогреваются внутренняя труба и цапфы, медленнее – барабан и развальцованные в его днищах трубки. Поэтому предусмотрено сальниковое соединение, позволяющее расширяться соприкасающимся частям сушилки независимо друг от друга. Наличие сальников требует медленного прогрева остывшей сушилки в течение 3–5 ч. С этой целью устанавливается байпасный па-

ропровод небольшого сечения, используемый только во время прогрева сушилки. Быстрое удаление воздуха и образовавшегося конденсата из межтрубного пространства производится через обводной трубопровод, минуя конденсационный горшок. Лишь при достижении давления пара в сушилке 0,5–0,8 атм конденсат направляется в конденсационный горшок.

Вращение паровых трубчатых сушилок осуществляется фрикционным приводом или с помощью зубчатой пары. Зубчатый венец монтируется снаружи барабана в передней его части и получает вращение от шестерни, насаженной на электродвигатель постоянного тока или асинхронный многоскоростной электродвигатель (рис. 1.9).

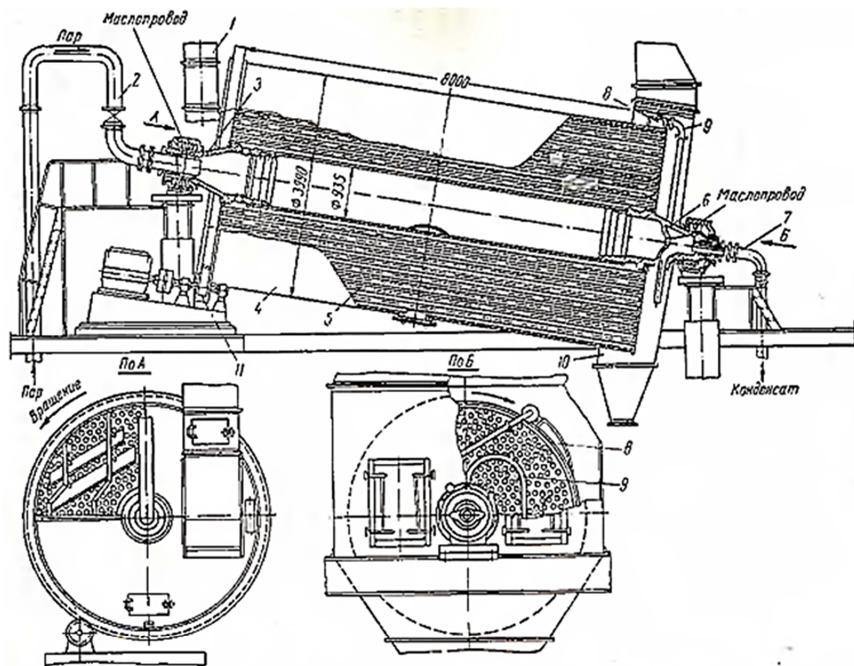


Рис. 1.9. Паровая трубчатая сушилка:

- 1 – питательное устройство; 2 – паропровод; 3 – передняя цапфа; 4 – барабан;  
 5 – трубки; 6 – задняя цапфа; 7 – конденсатопровод; 8 – водосборники;  
 9 – конденсатопроводящие трубки; 10 – выгрузочная камера; 11 – привод

Паровая трубчатая сушилка имеет ряд положительных сторон, позволивших занять ей должное место для сушки ряда сыпучих материалов, в особенности бурого и каменного угля. Эта сушилка сравнительно проста в эксплуатации, при обеспечении нормальной работы дает небольшой унос материала, отличается низкой энергоемкостью. Ее использование для подсушки топлива на электростанциях отработанным паром турбины дает высокий экономический эффект. При подсушке топлива перед сжиганием никаких требований в обеспечении равномерности влажности по фракциям не предъявляется.

Одним из решающих факторов получения продукции при сушке торфа для брикетов является равномерное распределение влаги между отдельными фракциями. С этой задачей паровая трубчатая сушилка не справляется. Влагоразность крупных и мелких частиц самая большая по сравнению с другими сушилками, применяемыми в торфобрикетном производстве.

### **Пневмопароводяная сушильная установка «ПЕКО»**

Пневматическая сушилка с двойным использованием тепла пара специально для сушки фрезерного торфа перед его брикетированием была предложена в конце 20-х годов норвежским инженером Томасом Грамом. Практически это предложение было осуществлено в начале 30-х годов английским теплотехническим обществом Пеко. С тех пор эти сушилки называются сушилками Пеко.

Пневмопароводяная сушильная установка непрерывного действия относится к сушилкам с внутренним подогревом и с конвективно-контактной передачей тепла.

В качестве теплоносителя используется пар и горячая вода, поступающие в межтрубное пространство. Сушильным агентом служит воздух.

Из пяти сушильных корпусов три паровые и два водяные.

Нумерация их принята совпадающей с направлением движения торфа через них. Сушка начинается в первом корпусе и заканчивается в пятом. Две первые по ходу материала водя-

ные сушилки производят начальную предварительную подсушку фрезерного торфа теплом низкого потенциала. Основная масса воды испаряется в паровых сушилках, в них заканчивается процесс сушки торфа. Эти три сушилки принято называть сушилками первого эффекта, а две водяные – сушилками второго эффекта. Сушильные корпуса обозначаются римскими цифрами I и II в зависимости от того, к какому эффекту они относятся, и первыми большими буквами латинского алфавита. Первый корпус, в который поступает исходный торф, имеет наименование IIВ. За ним последовательно располагаются сушильные корпуса IIА, IС, IV и IA, в последнем проходит окончательная досушка торфа до требуемой влажности.

Технологическая схема процесса сушки представлена на рис. 1.10.

Фрезерный торф после дробления и удаления крупных фракций транспортером (обычно скребковым) подается в загрузочный рукав сушилки IIВ. Для обеспечения достаточной герметичности системы поступление торфа в смесительную камеру производится барабанным питателем, выполняющим также роль затвора. Ввиду того, что смесительная камера находится под давлением воздуха, нагнетаемого вентилятором, то при недостаточной плотности затвора-питателя часть торфа может выдуться снова в рукав. Во избежание снижения производительности сушилки на некоторых предприятиях барабанные питатели заменены шнековыми или же используются те и другие. Поступающий в смесительную камеру торф подхватывается потоком воздуха и вдувается в трубки сушилки. В результате теплообмена между нагретыми стенками трубок и транспортируемой по ним аэросмесью часть влаги испаряется из торфа и поглощается воздухом, служащим сушильным агентом. На выходе из трубок сушилки торфовоздушная смесь поступает в направляющую камеру (шлем). Воздух же с неосевшими мелкими частицами торфа устремляется в выхлопную трубу циклона и далее направляется во вторую ступень очистки.

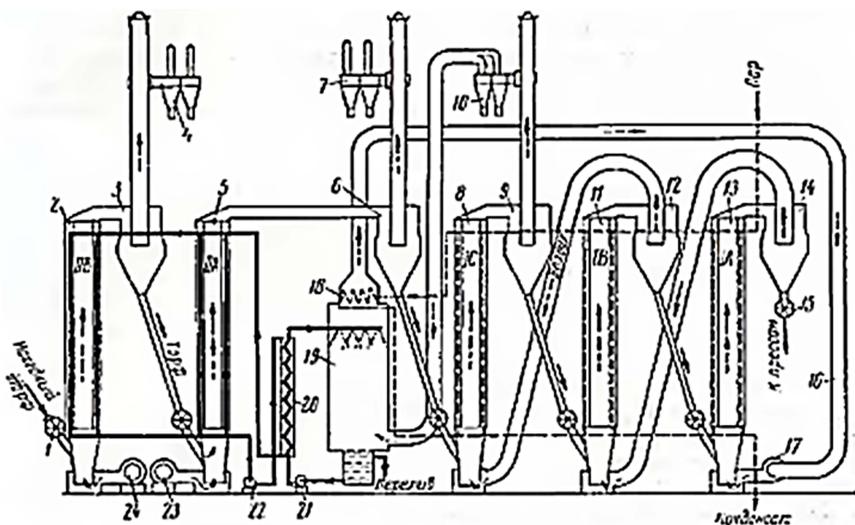


Рис. 1.10. Технологическая схема сушильной установки Пеко:

- 1 – барабанный питатель сушилки ПВ; 2 – сушильный корпус ПВ; 3 – циклон первой ступени очистки сушилки ПВ; 4 – вторая ступень очистки сушилки ПВ; 5 – сушильный корпус ПА; 6 – циклон сушилки ПА; 7 – вторая ступень очистки сушилки ПА; 8 – сушильный корпус IC; 9 – циклон сушилки IC; 10 – вторая ступень сухой очистки сушилок I эффекта; 11 – сушильный корпус; 12 – циклон сушилки IV; 13 – сушильный корпус IA; 14 – циклон сушилки IA; 15 – барабанный питатель для выдачи высушенного торфа; 16 – воздухопровод; 17 – центробежный вентилятор сушилок I эффекта IA-C; 18 – паровой калорифер; 19 – скруббер; 20 – теплообменник; 21 – центробежный насос шламовой воды; 22 – центробежный насос чистой воды; 23 – центробежный вентилятор сушилки ПА; 24 – центробежный вентилятор сушилки ПВ

### Пневогазовая сушилка

В 1872 г. инженером-поручиком Н. П. Бусыгиным впервые был предложен метод бескалориферной сушки материалов дымовыми газами. С этого времени сушка дымовыми газами получила свое применение в технике. Значительное распространение этот метод нашел в торфяной промышленности для сушки фрезерного торфа при его переработке в брикеты.

Дымовые газы служат транспортирующим средством, теплоносителем, сообщаящим тепло высушиваемому материалу, и сушильным агентом, поглощающим испаряемую влагу. Передача тепла происходит в основном конвективным способом.

Первые торфобрикетные заводы 40-х годов строились с применением обычной трубы-сушилки, нижний конец которой через футерованное колено соединялся с топкой, а другой – с осадительными аппаратами, предназначенными для выделения торфа из газового потока (рис. 1.11). Подаваемый в нижнюю часть сушилки торф подхватывается потоком газов и затем транспортируется через всю сушильную систему.

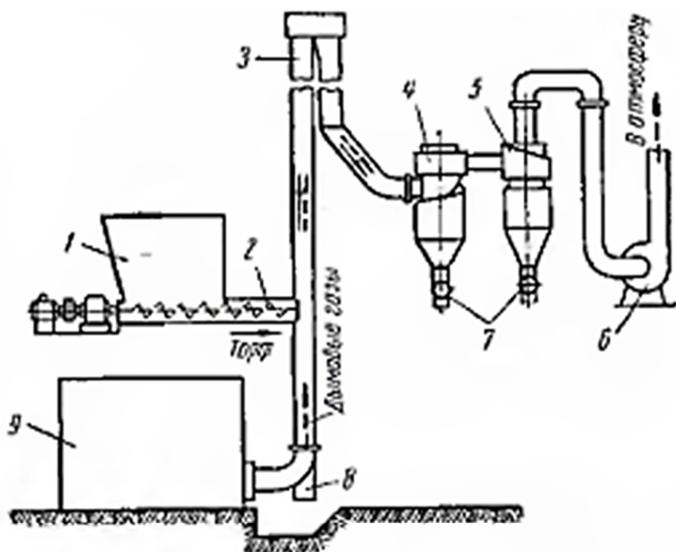


Рис. 1.11. Пневмогазовая труба-сушилка:

- 1 – бункер сырья; 2 – шнек-питатель; 3 – труба-сушилка;
- 4, 5 – сухие пылеосадительные аппараты; 6 – вентилятор;
- 7 – затворы-питатели; 8 – мигалка; 9 – топка

Движение газов по трубе-сушилке осуществляется вентилятором высокого давления, устанавливаемым после циклонов. Труба-сушилка имела длину 28 м и диаметр 0,8 м. Она

состояла из вертикального участка (восходящая ветвь) длиной 18,5 м и нисходящего участка, который присоединялся к циклонам. Основная часть трубы-сушилki монтировалась вне здания завода, на крыше.

Учитывая повышенный износ металла при пневматическом транспорте торфа, толщину трубы принимали равной 4–6 мм, иногда около 10 мм.

В зависимости от требуемой производительности диаметр трубы-сушилki может колебаться в довольно широких пределах. Однако из-за трудностей, возникающих при распределении материала по сечению трубы, обычно не превышают 1–1,1 м.

## **2. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК**

### **2.1. Материальный баланс брикетного завода**

Основной целью расчета материального баланса является установление необходимого количества сырья и материалов по операциям технологического процесса для обеспечения заданной производительности.

Расчет материального баланса завода по производству топливных брикетов составляется по отдельным операциям переработки с учетом потерь на каждой операции в следующей последовательности:

Часовая производительность цеха определяется по формуле

$$q = \frac{Q}{t}, \quad (2.1)$$

где  $q$  – часовая производительность цеха, т/ч;

$Q$  – производительность завода, т/год;

$t$  – число часов чистого времени работы завода в году (для торфобрикетного производств = 7200 ч).

$$q = \frac{240\,000}{7200} = 33,3 \text{ т/ч.}$$

Производительность отделения прессования с учетом потерь при складировании, рассчитывается по формуле

$$q' = \frac{q}{100 - K_5} \cdot 100, \quad (2.2)$$

где  $q'$  – производительность отделения прессования, т/ч;  
 $K_5 = 1\%$  – потери материала при складировании.

$$q' = \frac{33,3}{100 - 1} \cdot 100 = 33,6 \text{ т/ч.}$$

Производительность сушильного отделения с учетом потерь при прессовании

$$q'' = \frac{q'}{100 - K_4} \cdot 100, \quad (2.3)$$

где  $q''$  – производительность сушильного отделения, с учетом потерь при прессовании, т/ч;  
 $K_4 = 1\%$  – потери материала в отделении прессования.

$$q'' = \frac{33,6}{100 - 1} \cdot 100 = 33,9 \text{ т/ч.}$$

Производительность сушильного отделения с учетом потерь при сушке, рассчитывается по формуле

$$q''' = \frac{q''}{100 - K_3} \cdot 100, \quad (2.4)$$

где  $q'''$  – производительность сушильного отделения, с учетом потерь при сушке т/ч;

$K_3 = 2,5 \%$  – потери материала при сушке для поровой трубчатой сушилки.

$$q''' = \frac{33,9}{100 - 2,5} \cdot 100 = 34,7 \text{ т/ч.}$$

Количество материала, поступающее в сушильное отделение,

$$P' = \frac{q''' \cdot (100 - W_2)}{100 - W_1}, \quad (2.5)$$

где  $P'$  – количество материала, поступающего в сушильное отделение, т/ч;

$W_2$  – влажность готового продукта (сушонка), %;

$W_1$  – влажность поступающего материала, %.

$$P' = \frac{34,7 \cdot (100 - 15)}{100 - 40} = 49,1 \text{ т/ч.}$$

Количество влаги, испаряемой в сушильном отделении,

$$W_{\text{вл}} = P' - q''', \quad (2.6)$$

где  $W_{\text{вл}}$  – количество влаги, испаряемой в сушильном отделении, т/ч.

$$W_{\text{вл}} = 49,1 - 34,7 = 14,4 \text{ т/ч.}$$

Количество фрезерного торфа в качестве топлива для сушильной установки, необходимое для испарения влаги,

$$B = \frac{q_T \cdot W_{\text{вл}}}{Q_H^P}, \quad (2.7)$$

где  $B$  – количество фрезерного торфа в качестве топлива для сушильной установки, т/ч;

– для паротрубчатых сушилок

$$B = \frac{q_T \cdot W_{\text{вл}}}{Q_H^P} = \frac{4483,3 \cdot 14,4}{9511,5} = 6,7 \text{ т/ч}; \quad (2.7.1)$$

– для пневмогазовой

$$B = \frac{q_T \cdot W_{\text{вл}}}{Q_H^P} = \frac{5028 \cdot 14,4}{9511,5} = 7,62 \text{ т/ч}; \quad (2.7.2)$$

– для пневмопароводяной

$$B = \frac{q_T \cdot W_{\text{вл}}}{Q_H^P} = \frac{2514 \cdot 14,4}{9511,5} = 3,8 \text{ т/ч}; \quad (2.7.3)$$

$q_T$  – удельный расход тепла на испарение 1 кг влаги из торфа для паротрубчатых сушилок – 4483,3 кДж/кг исп. влаги, для пневмогазовой – 5028 кДж/кг, для пневмопароводяной сушилки 2514 кДж/кг;

$Q_H^P$  – низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг, рассчитывается по формуле

$$Q_H^P = 21\,907,4 \cdot \frac{(100 - W_1 - A^P)}{100} - 25,1 \cdot W_1, \quad (2.8)$$

где  $A^P$  – зольность торфа на рабочую массу, %,

$$A^p = \frac{A^c(100 - W_1)}{100}, \quad (2.9)$$

где  $A^c$  – зольность торфа на абсолютно сухое вещество, %.

$$A^p = \frac{20 \cdot (100 - 40)}{100} = 12 \%;$$

$$Q_H^p = 21\,907,4 \cdot \frac{(100 - 40 - 12)}{100} - 25,1 \cdot 40 = 9511,5 \text{ кДж/кг.}$$

Из расчета формул (2.7.1)–(2.7.3) мы видим, что количество фрезерного торфа в качестве топлива для сушильной установки меньше всего у пневмопароводяной сушилки. Из чего можно сделать вывод, что данная сушилка является самой экономичной с точки зрения экономии сырья, а самой нецелесообразной сушилкой является пневмогазовая.

Количество торфа, поступающего в подготовительное отделение,

$$P'' = \frac{P'}{100 - K_2} \cdot 100, \quad (2.10)$$

где  $P''$  – количество торфа, поступающего в подготовительное отделение, т/ч;

$K_2 = 3 \%$  – потеря торфа в подготовительном отделении.

$$P'' = \frac{49,1}{100 - 3} \cdot 100 = 50,6 \text{ т/ч.}$$

Количество торфа, поступающего в подготовительное отделение с учетом использования его в качестве топлива,

$$P_1'' = P'' + \frac{B}{100 - K_2} \cdot 100, \quad (2.11)$$

где  $P''$  – количество торфа, поступающего в подготовительное отделение, т/ч.

$$P_1'' = 50,6 + \frac{6,7}{100 - 3} \cdot 100 = 57,5 \text{ т/ч}; \quad (2.11.1)$$

$$P_1'' = 50,6 + \frac{7,62}{100 - 3} \cdot 100 = 58,4 \text{ т/ч}; \quad (2.11.2)$$

$$P_1'' = 50,6 + \frac{3,8}{100 - 3} \cdot 100 = 54,5 \text{ т/ч}; \quad (2.11.3)$$

Количество торфа, поступающего в брикетный цех, рассчитывается по формуле

$$P''' = \frac{P''}{100 - K_1} \cdot 100, \quad (2.12)$$

где  $P'''$  – количество торфа, поступающего в брикетный цех, т/ч;

$K_1 = 0,05$  % – потери торфа при разгрузке и подаче в подготовительный комплекс.

$$P''' = \frac{50,6}{100 - 0,05} \cdot 100 = 50,6 \text{ т/ч.}$$

Количество торфа, поступающего в брикетный цех,

$$P_n''' = P_1''' + \frac{B}{100 - K_1} \cdot 100, \quad (2.13)$$

где  $P'''$  – количество торфа, поступающего в брикетный цех.

$$P_1''' = 50,6 + \frac{6,7}{100 - 0,05} \cdot 100 = 57,3 \text{ т/ч}; \quad (2.13.1)$$

$$P_1''' = 50,6 + \frac{7,62}{100 - 0,05} \cdot 100 = 58,5 \text{ т/ч}; \quad (2.13.2)$$

$$P_1''' = 50,6 + \frac{3,8}{100 - 0,05} \cdot 100 = 54,4 \text{ т/ч}. \quad (2.13.3)$$

Расход фрезерного торфа для производства 1 тонны брикетов,

$$\mu = \frac{P'''}{q}, \quad (2.14)$$

где  $\mu$  – расход фрезерного торфа, т/т.

$$\mu = \frac{50,6}{33,3} = 1,519 \text{ т/т.}$$

Расход торфа для производства 1 т брикета условной влажности можно вычислить по формуле

$$\mu_{\text{усл}} = \mu \frac{(100 - \omega_1)}{(100 - \omega_{\text{усл}})}, \quad (2.15)$$

где  $\mu_{\text{усл}}$  – расход торфа, т/т.

$$\mu_{\text{усл}} = 1,519 \frac{(100 - 40)}{(100 - 40)} = 1,519 \text{ т/т.}$$

Общий расход фрезерного торфа для производства 1 т брикета с учетом работы сушильной установки, рассчитывается по формуле

$$\mu_n = \frac{P_n^m}{q}, \quad (2.16)$$

где  $\mu_1$  – общий расход фрезерного торфа, т/т.

$$\mu_1 = \frac{57,3}{33,3} = 1,72 \text{ т/т}; \quad (2.16.1)$$

$$\mu_2 = \frac{58,5}{33,3} = 1,75 \text{ т/т}; \quad (2.16.2)$$

$$\mu_3 = \frac{54,4}{33,3} = 1,63 \text{ т/т}. \quad (2.16.3)$$

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Перспективы развития новых технологий добычи торфа / А. В. Михайлов, Э. А. Кремчеев, А. В. Большунов, Д. О. Нагорнов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – № 9. – С. 189–194.
2. Березовский, Н. И. Обезвоживание полезных ископаемых: идеи и практика энергосбережения / Н. И. Березовский. Б. А. Богатов. – Минск: Технопринт, 2000 – 164 с.
3. Авдохин, В. М. Основы обогащения полезных ископаемых: учебник для вузов / В. М. Авдохин. – М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2006. – 417 с.
4. Торф фрезерный для производства топливных брикетов. Технические требования: СТБ–917–2006.
5. Охрана окружающей среды и природопользование. Атмосфера. Выбросы загрязняющих веществ в окружающую среду: ТКП 17.08–01–2006 (02120).
6. Физико-механические свойства насыпных грузов в горной промышленности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://window.edu.ru/catalog/pdf2txt/998/68998/43358?p\\_page=1](http://window.edu.ru/catalog/pdf2txt/998/68998/43358?p_page=1). – Дата доступа: 20.04.2020.
7. Основы сушки материалов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://vse-lekcii.ru/zheleznodorozhnyj-transport/hladotransport/osnovy-sushki-materialov>. – Дата доступа: 28.04.2020.
8. Основы сушки материалов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.eti.su/articles/over/over\\_1555.html](http://www.eti.su/articles/over/over_1555.html). – Дата доступа: 28.04.2020.

Учебное издание

**БЕРЕЗОВСКИЙ** Николай Иванович  
**БОРИСЕЙКО** Владимир Васильевич  
**КОСТЮКЕВИЧ** Елена Казимировна  
**ТРУШ** Алексей Юрьевич

## **ГОРНОЕ ДЕЛО**

Пособие  
для студентов специальности  
1-36 10 01 «Горные машины и оборудование  
(по направлениям)»

Редактор *В. И. Акулёнок*  
Компьютерная верстка *Н. А. Школьниковой*

Подписано в печать 24.02.2021. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 2,73. Уч.-изд. л. 2,14. Тираж 100. Заказ 658.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя  
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.