

У. ВЕРГИ

## ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ПНЕВМОПАРОВОДЯНОЙ СУШИЛКИ ФРЕЗЕРНОГО ТОРФА

В целях повышения производительности на многих торфобрикетных предприятиях реконструированы пневмопароводяные сушилки. На новых торфобрикетных предприятиях устанавливаются более мощные импортные сушилки новой конструкции. Известно, однако, что разработка конструкций импортных сушилок, как и их реконструкция на предприятиях, проводится без теплотехнических расчетов. Из-за отсутствия достаточно точной и удобной методики расчета [1-4] конструктивные размеры и технологические параметры сушилки определяют приблизительно на основе эксплуатационного опыта. Об эффективности новой конструкции можно, таким образом, судить лишь после ее осуществления в металле, при проведении балансовых испытаний. Получение объективных данных в ходе эксплуатации затруднительно, так как сушилки, как правило, недостаточно оснащены контрольно-измерительными приборами и поэтому не позволяют учесть все искажающие воздействия.

Ниже приводится методика теплового расчета пневмопароводяной сушилки фрезерного торфа, позволяющая проводить на ЭЦВМ с удовлетворительной точностью проверочные теплотехнические расчеты различных конструкций пневмопаровых и пневмопароводяных сушилок.

Как показывает экспериментальное исследование движения аэровзвеси в вертикальных трубах [5], при скоростях движения, встречающихся в пневмопароводяных сушилках, твердые частицы отжимаются к периферии потока. В профилированных трубах сушилки этому способствует и винтообразная навальцовка труб.

Можно предполагать, что частицы торфа значительное время своего пребывания в сушильной трубе двигаются близко к трубной стенке, где они интенсивно нагреваются от более нагретого воздуха, а также излучением и контактным теплообменом от трубной стенки [6]. Это предположение подтвердилось при анализе экспериментальных данных, полученных Л. Никитиной на опытной установке, а также сотрудниками Московского торфяного института (МТИ) и Всесоюзного теплотехнического института (ВТИ) на промышленной сушилке.

Оказывается, что формула количества тепла, принимаемого торфом в процессе сушки,

$$Q_T = S_T k_T (t_{в.п} - t_{в.м.п}) \text{ кВт} \quad (1)$$

дает хорошее совпадение с экспериментальными данными, если приведенная температура воздуха, учитывающая и теплообмен с трубной стенкой, определяется по формуле

$$t_{в.п} = 0,75 \bar{t}_c + 0,25 \bar{t}_в \text{ град.} \quad (2)$$

Приведенная температура мокрого термометра определяется в этом случае по приведенной температуре и средней влажности воздуха

$$t_{в.м.п} = f(t_{в.п}, \bar{d}) \text{ град.} \quad (3)$$

Средние значения параметров  $\bar{d}$ ,  $\bar{t}_в$ ,  $\bar{u}$  и т. д. здесь и дальше определяются как арифметические средние от их входных и выходных величин.

Теплообменная поверхность торфа, находящегося при прохождении аэровзвеси в сушильных трубах корпуса, равна

$$S_{\tau} = 6 g_{\tau} / D_{\exists} \bar{\gamma}_{\tau} \quad \text{м}^2, \quad (4)$$

где эквивалентный диаметр частиц [7, 8]

$$D_{\exists} = 0,75 \bar{D} \quad \text{м}. \quad (5)$$

Средний диаметр частиц  $\bar{D}$  определяется по фракционному составу торфа как средний весовой при входе в сушильный корпус.

Количество торфа, находящегося одновременно в сушильных трубах корпуса,

$$g_{\tau} = \mu F n l \quad \text{кг}, \quad (6)$$

где объемная концентрация торфа [9, 10]

$$\mu = G_{\tau} / n F (\bar{v}_в - v_0) \quad \text{кг/м}^3. \quad (7)$$

Условная скорость движения торфа относительно воздуха в профилированных трубах сушильных корпусов определяется, как показали проверочные расчеты, с достаточной точностью по формуле

$$v_0 = 7,4 \sqrt{D_{\exists} \bar{\gamma}_{\tau} / \bar{\gamma}_в} \quad \text{м/сек}. \quad (8)$$

Для определения удельного веса торфа С. Забродский\* дает следующее уравнение:

$$\bar{\gamma}_{\tau} = 650 (1 + \bar{u}) / (1 + 0,36 \bar{u}) \quad \text{кг/м}^3. \quad (9)$$

Коэффициент теплообмена

$$k_{\tau} = \text{Nu}_{\tau} \bar{\lambda}_в / D_{\exists} \quad \text{кВт/м}^2 \cdot \text{град}. \quad (10)$$

На основе регрессионного анализа величин критерия Нуссельта приведенного теплообмена торфа со стенкой сушильной трубы и воздухом, которые определены по экспериментальным данным, получена формула

$$\text{Nu}_{\tau} = 1,32 \text{Re}^{0,5} (\bar{u} / u_{\kappa})^{1,5}, \quad (11)$$

где критическая влажность торфа по [2] равна

$$u_{\kappa} = 0,5 + 0,25 \cdot 10^{-2} (t_{в.п} - t_{в.м.п}) \quad \text{кг/кг}. \quad (12)$$

При  $\bar{u} / u_{\kappa} \geq 1$  принимается  $\bar{u} / u_{\kappa} = 1$ .

Используемые экспериментальные данные получены Л. Никитиной на опытной установке и в МТИ и ВТИ на промышленной сушилке. Выведенное по этим данным уравнение (11) — сравнительно универсальное, так как опыты проведены при очень разных режимах сушки, охватывающих подавляющее большинство возможных в практике случаев.

\* С. С. Забродский, Вопросы скоростной глубокой сушки фрезерного торфа во взвешенном состоянии, Диссертация, ИЭ АН БССР, 1949.

Уравнение (11) можно привести к виду

$$\text{Nu}_T / \text{Re}^{0,5} = 1,32 (\bar{u}/u_k)^{1,5} \quad (13)$$

На рис. 1 изображены для сравнения опытные точки и прямая, определенная формулой (13). Некоторый разброс опытных точек объясняется тем, что при загрязнении сушилки уменьшается теплопередача к торфу, а опыты проводились при разных степенях загрязнения сушилки. Формула (11) характеризует теплообмен при слабой загрязненности сушилки. Такая загрязненность наблюдается при работе сушилки на осоковом и тростниковом торфе со степенью разложения 20—25% на четвертый день после чистки.

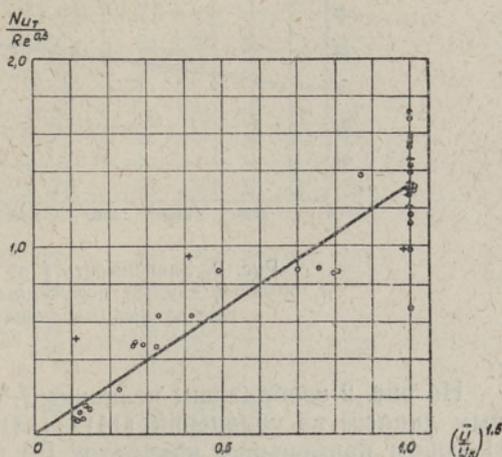


Рис. 1. Зависимость  $\text{Nu}_T/\text{Re}^{0,5}$  от  $(\bar{u}/u_k)^{1,5}$ :

+ опытные данные, полученные Л. Никитиной; o опытные данные, полученные МТИ и ВТИ.

В результате анализа экспериментальных данных для количества тепла, принимаемого воздухом, составлено эмпирическое уравнение

$$Q_b = k_b S_c [f t_{T,п} + (1 - f) \bar{t}_c - \bar{t}_b] \text{ кВт}, \quad (14)$$

где приведенный коэффициент теплообмена

$$k_b = 46,5 \cdot 10^{-3} \text{ кВт/м}^2 \cdot \text{град}, \quad (15)$$

приведенная температура поверхности торфа [2]

$$t_{T,п} = t_{в,п} - \psi (t_{в,п} - t_{в,м,п}) \text{ град} \quad (16)$$

и относительная скорость сушки

$$\psi = (\bar{u} - u_p) / (u_k - u_p), \quad (17)$$

где равновесная влажность торфа

$$u_p = 0,000666e^{1,79\bar{d}/\bar{d}_n} (122 - t_{в,п}) \text{ кг/кг}. \quad (18)$$

Формула (18) воспроизводит с точностью  $\pm 0,012 \text{ кг/кг}$  величины равновесной влажности  $u_p$ , приведенные в [11] для верхового торфа со степенью разложения 30%.

Если  $t_{в,п} \geq 122^\circ \text{C}$ , то  $u_p = 0$ .

Если  $\bar{u} \leq u_p$ , то принимается  $\psi = 0$ , и если  $\bar{u} \geq u_k$ , то  $\psi = 1$ .

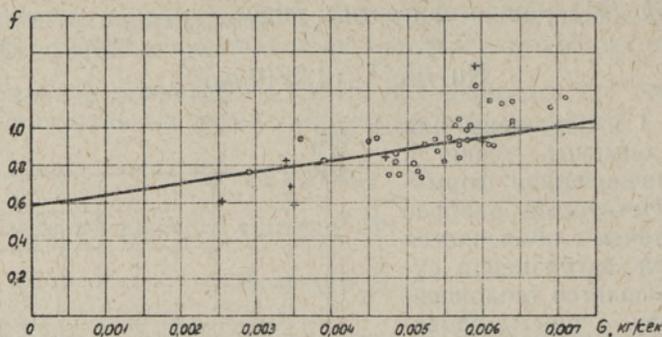


Рис. 2. Зависимость  $f$  от расхода торфа  $G_T$ :  
 + опытные данные, полученные Л. Никитиной; o опытные данные, полученные МТИ и ВТИ.

На рис. 2 изображены величины  $f$ , определенные по экспериментальным данным из уравнений (14)—(18). По экспериментальным точкам способом наименьших квадратов [12] получена формула для определения  $f$ :

$$f = 0,59 + 59,6G_T/n. \quad (19)$$

На основе уравнений теплового и массового баланса [4] влажность торфа при выходе из сушильного корпуса

$$u_{\text{вых}} = u_{\text{вх}} - \frac{Q_T - G_T(t_{\text{т. вых}} - t_{\text{т. вх}})(1,97 + 4,19u_{\text{вых}})}{G_T(2,49 \cdot 10^3 + 1,97t_{\text{т. п}} - 4,19t_{\text{т. вх}})} \text{ кг/кг}. \quad (20)$$

Под выходом из сушильного корпуса подразумевается выход среды из циклона корпуса.

При выходе из сушильного корпуса температура торфа

$$t_{\text{т. вых}} = t_{\text{в. вых}} - \psi_{\text{вых}}(t_{\text{в. вых}} - t_{\text{в. м. вых}}) \text{ град} \quad (21)$$

и температура воздуха

$$t_{\text{т. вых}} = (I_{\text{вых}} - 2,49 \cdot 10^3 \cdot d_{\text{вых}})/(1,01 + 1,96 \cdot d_{\text{вых}}) \text{ град}. \quad (22)$$

Энтальпия воздуха при выходе из сушильного корпуса

$$I_{\text{вых}} = I_{\text{вх}} + \frac{Q_{\text{в}} + Q_{\text{т}} - G_{\text{т}}[1,97(t_{\text{т. вых}} - t_{\text{т. вх}}) + 4,19(t_{\text{т. вых}} u_{\text{вых}} - t_{\text{т. вх}} u_{\text{вх}})]}{L} \text{ кДж/кг}, \quad (23)$$

и при входе в сушильный корпус

$$I_{\text{вх}} = (1,01 + 1,96d_{\text{вх}})t_{\text{в. вх}} + 2,49 \cdot 10^3 \cdot d_{\text{вх}} \text{ кДж/кг}. \quad (24)$$

Влагосодержание воздуха при выходе из сушильного корпуса

$$d_{\text{вых}} = d_{\text{вх}} + G_{\text{т}}(u_{\text{вх}} - u_{\text{вых}})/L \text{ кг/кг}. \quad (25)$$

Наименование параметра	Ед. изм.	Номер опыта															
		1		2		3		4		5		6		7		8	
		Опыт	Расчет	Опыт	Расчет	Опыт	Расчет	Опыт	Расчет	Опыт	Расчет	Опыт	Расчет	Опыт	Расчет	Опыт	Расчет
День работы после чистки	—	2	(4)	4	(4)	4	(4)	5	(4)	7	(4)	—	(4)	—	(4)	—	(4)
Расход торфа на сушку (сухой вес)	кг/сек	3,14	3,14	3,22	3,22	3,44	3,44	3,55	3,55	2,97	2,97	3,64	3,64	2,01	2,01	2,86	2,86
Относительная влажность сырого торфа	кг/кг	0,49	0,49	0,49	0,49	0,44	0,44	0,45	0,45	0,48	0,48	0,45	0,45	0,51	0,51	0,51	0,51
Относительная влажность торфа после 1-го сушильного корпуса	кг/кг	0,45	0,46	0,43	0,46	0,41	0,42	0,42	0,42	0,46	0,45	0,42	0,42	0,43	0,47	0,48	0,49
То же после 2-го	кг/кг	0,41	0,41	0,40	0,42	0,38	0,37	0,38	0,38	0,43	0,41	0,38	0,37	0,38	0,40	0,44	0,45
То же после 3-го	кг/кг	0,26	0,36	0,32	0,36	0,29	0,29	0,29	0,29	0,35	0,31	0,28	0,29	0,26	0,28	0,40	0,40
То же после 4-го	кг/кг	0,13	0,14	0,16	0,14	0,14	0,13	0,15	0,16	0,17	0,15	0,14	0,14	0,12	0,15	0,22	0,16
То же после 5-го	кг/кг	0,10	0,12	0,12	0,12	0,11	0,11	0,13	0,13	0,12	0,12	0,12	0,12	0,08	0,12	0,14	0,13

Расчет сушильного корпуса проводится методом повторных приближений, а остальных теплообменных аппаратов — общепринятыми методами, изложенными в [13–15].

Совместный расчет сушилки проводится по отдельным теплообменным аппаратам тоже способом повторных приближений. При этом для расчета каждого следующего аппарата в качестве исходных данных используются результаты расчета предыдущего аппарата.

Данные для первого шага приближения задаются. В ходе расчета при каждом шаге приближения данные, заданные в начале расчета, уточняются. Использование способа расчета, сходного с методом Зайделя, применяемого для решения систем уравнений, обеспечивает хорошую сходимость расчета. Из-за большого объема вычислительной работы расчет целесообразно проводить на ЭЦВМ. Время расчета на ЭЦВМ одного режима сушилки около 5 мин.

О точности метода расчета можно судить по таблице, где приведены результаты проверочных расчетов пневмопароводяной сушилки, проведенных на ЭЦВМ «Минск-22», вместе с данными, полученными на балансовых испытаниях промышленной сушилки.

Расчеты проведены для средней степени загрязненности сушилки, которая наблюдалась при рассматриваемых испытаниях примерно на четвертый день работы после чистки. Опыты № 1—5 проводились в период семисуточной непрерывной работы установки, что позволило отметить зависимость испарительной способности сушилки от загрязненности.

Простое изменение программы при конструктивных изменениях сушилки и удовлетворительная точность расчета при достаточно широком пределе изменения параметров сушилки позволяют легко провести на ЭЦВМ проверочные расчеты новых конструкций сушилок.

#### Обозначения

$t$ — температура, град;	$\gamma$ — удельный вес, кг/м <sup>3</sup> ;
$d$ — влажность воздуха, кг/кг;	$\mu$ — объемная концентрация торфа, кг/м <sup>3</sup> ;
$u$ — абсолютная влажность торфа, кг/кг;	$Q$ — тепловой поток, квт;
$G$ — расход торфа, кг/сек;	$k$ — коэффициент теплообмена, квт/м <sup>2</sup> · град;
$g$ — вес торфа, кг;	$f$ — доля теплообменной поверхности, участвующей в теплообмене;
$v$ — скорость движения, м/сек;	$\varphi$ — относительная скорость сушки;
$D$ — диаметр частиц торфа, м;	$\lambda$ — коэффициент теплопроводности, квт/м <sup>2</sup> · град.
$l$ — длина сушильной трубы, м;	
$F$ — поперечное сечение сушильной трубы, м <sup>2</sup> ;	
$S$ — теплообменная поверхность, м <sup>2</sup> ;	
$n$ — количество сушильных труб;	

#### Индексы

$v$ — воздух;	$вт$ — от воздуха торфу;
$t$ — торф;	$св$ — от трубной стенки воздуху;
$с$ — сушильная труба;	$ст$ — от трубной стенки торфу;
$п$ — приведенный, расчетный;	$о$ — эквивалентный;
$р$ — равновесная;	$о$ — относительный;
$к$ — критическая;	$вых$ — выходящий из циклона сушильного корпуса;
$м$ — мокрого термометра;	$вх$ — входной.
$н$ — насыщения;	

## ЛИТЕРАТУРА

1. Никитина Л. М., Тр. Ин-та энергетики АН БССР, вып. 2, 178 (1955).
2. Любошиц И. Л., Тр. Ин-та энергетики АН БССР, вып. 5 (1958).
3. Фройштетер Г. Б., Александрович Г. В., Тр. НИИ местной и топливной промышленности, вып. 17, 135 (1962).
4. Лебедев П. Д., Расчет и проектирование сушильных установок, М., Госэнергоиздат, 1963.
5. Худяков Г. Н., Изв. АН СССР ОТН, № 7, 1022 (1953).
6. Горбис З. Р., Изв. высш. уч. завед., Энергетика, № 4, 95 (1962).
7. Лыков А. В., Тепло- и массообмен в процессах сушки, М., Госэнергоиздат, 1956.
8. Федоров И. М., Теория и расчет процесса сушки во взвешенном состоянии, М., Госэнергоиздат, 1955.
9. Таганцева Т. Ф., Торф. пром-сть, № 5, 30 (1956).
10. Таганцева Т. Ф., Торф. пром-сть, № 2, 17 (1957).
11. Никитина Л. М., Таблицы равновесного удельного влагосодержания и энергии связи влаги с материалом, М., Госэнергоиздат, 1963.
12. Гутер Р. С. и Овчинский Б. В., Элементы численного анализа и математической обработки результатов опыта, М., Физматгиз, 1962.
13. Михеев М. А., Основы теплопередачи, М., Госэнергоиздат, 1956.
14. Егоров Н. Н., Охлаждение газа в скрубберах, М., Госхимиздат, 1954.
15. Теплотехнический справочник, М., Госэнергоиздат, 1957.

*Проектно-технологический  
и научно-исследовательский  
институт, Таллин*

Поступила в редакцию  
23/VII 1968

U. VERGI

### FREESTURBA PNEUMAATILISE AURU-VEEKUIVATI SOOJUSARVUTUS

Freesturba pneumaatilise auru-veekuivati katseandmetele tuginedes leitakse, et kuivati torude seintelt turbale ülekantava soojuse hulk on avaldatav valemitega (1)—(12) ja õhule ülekantava soojuse hulk valemitega (14)—(19). Tabelis võrreldakse arvutustulemusi katseandmetega.

U. VERGI

### DIE WÄRMERECHNUNG DER FRÄSTORF-DAMPF-WASSER-TROCKENANLAGE

Die Auswertung einer mit pneumatischer Dampf-Wasser-Trockenanlage für Frästorf angestellten Versuchsreihe ergibt, daß die von den Rohrwänden dem Torf, beziehungsweise der Luft übertragene Wärmemenge durch die Gleichungen (1) bis (12) und (14) bis (19) ausgedrückt werden kann.

Die Vergleichungsergebnisse der errechneten und experimentell ermittelten Daten werden in der beigefügten Tafel angeführt.