

УДК 677.5

*А.Д. Жуков, Т.В. Смирнова***ТЕПЛОВАЯ ОБРАБОТКА
МИНЕРАЛОВАТНОГО КОВРА**

Тепловая обработка является одним из важнейших процессов при производстве минераловатных изделий и в основном осуществляется продувкой горячего теплоносителя – конвективным нагревом. Знание характеристик и закономерностей протекания позволяет решать технологические задачи.

Определение параметров сушки и времени, необходимого для тепловой обработки основано на исследовании тепло- и влагообмена в минераловатном слое. Исследование нагрева минераловатного слоя показывает, что по мере удаления участков слоя от места входа теплоносителя их прогрев замедляется. Выходная кривая в первый период имеет незначительный подъем. Затем происходит быстрый прогрев слоя и у кривой наблюдается практически постоянный угол наклона. В третий период температура слоя приближается к температуре теплоносителя.

В основу методики определения продолжительности тепловой обработки минераловатного ковра положен принцип балансовых соотношений между количеством тепла, потребленного на тепловую обработку ковра и количеством израсходованного. Общая продолжительность тепловой обработки материала складывается из времени формирования зоны теплообмена, времени перемещения зоны по толщине ковра и времени, необходимого для завершения поликонденсации связующего.

При температурах теплоносителя 180...200 °С общая продолжительность тепловой обработки регламентируется в основном временем сушки и прогрева минераловатного ковра. Следовательно, обеспечив соответствующие скорости продувки теплоносителя через материал, можно сократить время его тепловой обработки более чем в 2 раза.

Полученные зависимости приведены в номографический вид и удобны для расчета камер тепловой обработки и определения продолжительности технологического процесса.

Ключевые слова: волокнистый ковер, гидравлическое сопротивление, пористость, теплоноситель, число Рейнольдса.

*A.D. Zhukov, T.V. Smirnova***HEAT TREATMENT
OF MINERAL WOOL**

Heat treatment is one of the most important constituents of the process of manufacturing of mineral wool products. It represents the blow-off of the heat carrier, or convective heating. Awareness of the properties and natural laws of the flow ensures successful resolution of technology-related problems. Research of heat and moisture exchange inside the mineral wool layer facilitates the resolution of several practical problems, namely, identification of dehumidification parameters, and the period of exposure to heat treatment.

By assuring the appropriate rate of the purge fluid through the material, we can reduce the time of its heat treatment by more than twice. This technique is useful for calculating the thermal processing chamber parameters and for determining the duration of the process.

Research of the process of heating of a mineral wool layer have proven that the further the section of the layer from the point of the heat carrier entry, the slower the heating process. The curve describing the first period is oriented upwards. Fast layer heating follows the first period; therefore, the curve displays an invariable inclination angle. In the third period, the temperature of the layer gets closer to the temperature of the heat carrier.

The methodology of identification of the period of exposure to heat treatment of a mineral wool mat is based on the principle of balanced correlations between the amount of heat consumed in the course of thermal processing of a mat and the amount of spent heat. The overall period of exposure to heat treatment is composed of the period of the heat exchange area formation, the period of its travel inside the mat, and the period of polycondensation of the binding agent.

If the temperature of the heat carrier is 180–200 degrees Celsius, the overall period of exposure to heat treatment is mainly driven by the time required for mat dehumidification and heating. Therefore, sufficient blow-off rate may reduce the period of exposure to thermal treatment twofold.

Dependencies generated within the framework of the research are represented as nomographic values for the purposes of analysis of thermal treatment chambers and identification of the processing period.

Key words: heat treatment, mineral cotton products, convective heating.

Исследование тепло- и влагообмена в минераловатном слое направлено на решение ряда практических задач и в частности определения параметров сушки и времени, необходимого для тепловой обработки.

Аналитическое решение системы дифференциальных уравнений, описывающих «чистый» теплообмен, не осложненный массообменом, для случая, когда можно пренебречь термическим сопротивлением частиц, независимо друг от друга выполнили А. Анцелиус и Т. Шуман. Решение Т. Шумана правомерно для анализа теплообмена в плоском минераловатном ковре с очень небольшой влажностью (при введении связующего методом распыления). Это решение имеет вид

$$\frac{\partial t_n}{\partial \tau} + v_n \frac{\partial t_n}{\partial X} = -\frac{\alpha_v}{c_n m'} (t_n - t_c);$$

$$\frac{\partial t_c}{\partial \tau} = \frac{\alpha_v}{c_c} (t_n - t_c),$$

где t_n , t_c – температура потока и слоя, °С; v_n – скорость газа, отнесенная к полному сечению слоя; X – линейная координата, м; c_n , c_c – теплоемкость потока и слоя, кДж/м³·°С; граничные и начальные условия:

$$X = 0 \quad t_n = t_n^0$$

$$\tau = 0 \quad t_c = t_c^0$$

где t_n^0 , t_c^0 – температура потока на входе в слой и начальная температура слоя, °С.

Сложность решения задачи о теплообмене в слое, особенно состоящем из тонкодисперсных частиц, при продувке горячим теплоносителем в нестационарных условиях, заключается в трудности экспериментального определения температур потока и поверхности частиц. В связи с этим обстоятельством и неопределенностью контактной поверхности слоя (зернистого, волокнистого) вводят понятие объемного коэффициента теплообмена α_v от потока к твердым частицам, рассчитанного на единицу объема слоя:

$$\alpha_v = \alpha / S.$$

Основная задача исследования теплообмена между слоем и потоком состоит в том, чтобы получить данные для расчета продолжительности тепловой обработки изделий, что в свою очередь сводится к определению коэффициента теплообмена при различных параметрах потока и структурных характеристиках минераловатного слоя. Следовательно, необходимо установить критериальную зависимость $Nu_3 = f(Re_3)$.

В диапазоне чисел Re 8—12 с учетом тепловыделения связующего возможно использование уравнения, которое является аппроксимацией функции (рис. 1): $Nu = 0,001Re^{0,9}$, или при чистом теплообмене зависимость: $Nu = 0,015Re$.

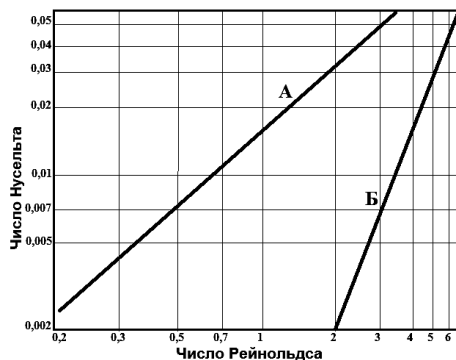


Рис. 1. Зависимость $Nu = f(Re)$: А – чистый теплообмен в минераловатном ковре; Б – теплообмен во влажном минераловатном ковре, осложненный экзотермическими реакциями

К. Пауленисом в области чисел Re от 3,56 до 8,64 для минераловатного ковра плотностью 230 кг/м^3 для описания процесса теплообмена в камерах тепловой обработки предложено уравнение $Nu = 0,0102Re^{0,839}$. А.И. Полозовым для высоковлажного ковра ($U = 1 \text{ кг/кг}$) получена зависимость $Nu = 0,00253Re^2$.

Полученные различными авторами эмпирические зависимости по определению продолжительности тепловой обработки материалов имеют несложный вид, но содержат определенные опытным путем коэффициенты, справедливые только для исследуемого материала.

А.И. Муравьев, исследуя процесс тепловой обработки мокрой льно-тресты при реверсивном движении воздуха через слой, получил зависимость:

$$\tau = \frac{45,4P_c^{0,9}K}{(v\rho_r)^{0,85}\Delta d} \left[2,21g \frac{U-U_p}{U_2-U_p} + 0,375(U_1-U_2) \right],$$

где $K = 1,72 \dots 2$ – поправочный коэффициент на производственные условия; P_c – нагрузка слоя, кг/м^2 ; Δd – сушильный потенциал воздуха, г/кг сухого воздуха.

Г.А. Иванова для расчета продолжительности прогрева и сушки минераловатного ковра предлагает следующую зависимость: $\tau = A \exp(-\alpha v)$ или при $v = 0,4 \text{ м/с}$: $\tau = a - bt$. Коэффициенты приведены в таблице.

Коэффициенты A , α , a , b в зависимости от условий прогрева

Условия	A	α	a	b
Сухие образцы	266	0,4	432 с	1,3 $с/^\circ\text{C}$
Влажные образцы с $U=0,7 \text{ кг/кг}$	27,3	2,58	18 мин	0,0662 $\text{мин}/^\circ\text{C}$
Влажные образцы с $U=1,0 \text{ кг/кг}$	32	2,13	24,6 мин	0,0486 $\text{мин}/^\circ\text{C}$

Сушка и нагрев минераловатного ковра. Типичная картина нагрева минераловатного слоя со связующим введенным распылением приведена на рис. 2. Как видно из рисунка, по мере удаления участков слоя от места входа теплоносителя их прогрев замедляется. Выходная кривая в первый период имеет незначительный подъем. Затем происходит быстрый прогрев слоя и у кривой наблюдается практически постоянный угол наклона. В третий период температура слоя приближается к температуре теплоносителя.

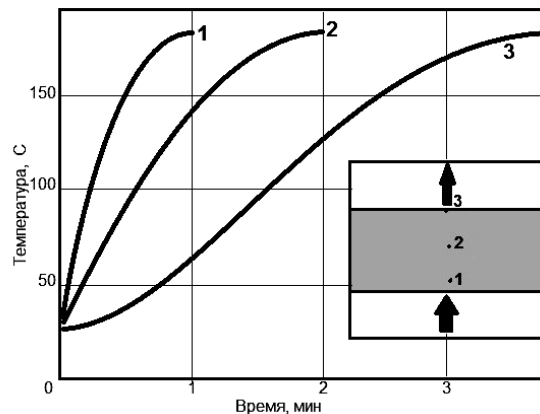


Рис. 2. Термограмма минераловатной плиты плотностью 200 кг/м^3 ; толщиной $0,05 \text{ м}$; температура теплоносителя $180 \text{ }^\circ\text{C}$; скорость продувки теплоносителя $0,13 \text{ м/с}$; гидравлическое сопротивление $1,0 \text{ кПа}$: 1 – температура плиты на высоте 10 мм ; 2 – температура плиты на высоте 25 мм ; 3 – выходная температура

Продолжительность тепловой обработки изделий имеет обратную линейную зависимость от скорости продувки теплоносителя.

Значительное влияние на кинетику нагрева минераловатного ковра имеет конструкция транспортных лент конвейера. Отсюда следует важный практический вывод: при выносе обратных ветвей тяжелых конвейеров наружу и неизбежном их охлаждении, срок тепловой обработки значительно удлиняется, а расход топлива возрастает.

При введении связующего методом пролива ($U_p = 1,2$ кг/кг) процесс сушки и нагрева ковра имеет существенные особенности. Анализ температурных кривых (рис. 3) позволяет сделать вывод о том, что при тепловой обработке высоковлажностного ковра на кривых нагрева наблюдается площадка, точно соответствующая температуре мокрого термометра. Эта площадка обусловлена фазовым превращением влаги – ее испарением, и фиксирует движение фронта испарения в направлении движения теплоносителя. За фронтом испарения теплоноситель полностью насыщен влагой. До начала подъема выходной температурной кривой (4) процесс идет в периоде постоянной скорости сушки. Затем наступает кратковременный период падающей скорости сушки, в котором темп подъема температурной кривой аналогичен нагреву ковра со связующим, введенным распылением.

При этом необходимо учитывать, что слой ковра (со связующим введенным распылением) со стороны входа теплоносителя уже через короткий промежуток времени прогревается до высокой температуры, и процесс отверждения связующего происходит практически одновременно с испарением влаги. В опытах установлено влияние скорости продувки теплоносителя на кинетику процесса. Как и следовало ожидать, эта зависимость имеет линейный характер: при увеличении скорости теплоносителя, скажем в 2 раза, скорость прогрева увеличивается в 2 раза.

В основу разработки *методики определения продолжительности тепловой обработки минераловатного ковра с использованием балансовых соотношений* между количеством тепла, потребленного на тепловую обработку ковра и количеством израсходованного [18], положен следующий механизм тепло- и массопереноса в минераловатном ковре.

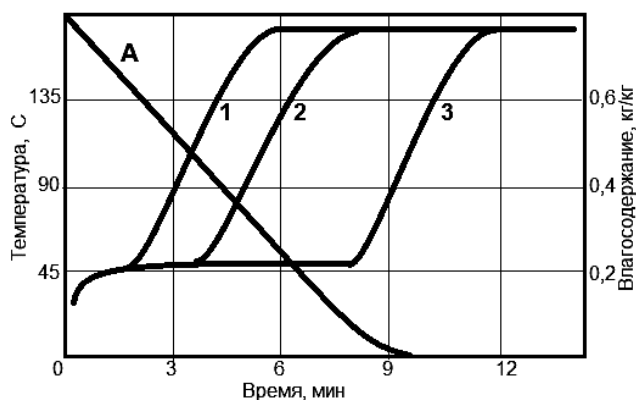


Рис. 3. Термограмма нагрева минераловатного ковра из гидромассы плотностью 208 кг/м³, при содержании связующего 18 %; влагосодержания 0,8 кг/кг; толщине 0,05 м; скорости теплоносителя 0,6 м/с и его температуре 180 °С: А – кривая сушки; температура ковра по высоте: 1 – 0,01 м; 2 – 0,025 м; 3 – 0,048 м

Удаление влаги и прогрев материала происходит не по всему объему ковра сразу, а лишь в определенной зоне тепломассообмена высотой h_T (рис. 4). В этой зоне температура материала и теплоносителя непрерывно возрастает от температуры мокрого термометра t_{MT} до температуры теплоно-

сителя при входе в ковер t_{Γ}^0 . После того, как время, равное продолжительности формирования зоны теплообмена τ_1 истечет, зона приобретает устойчивые границы и движется по толщине ковра в направлении движения теплоносителя с приблизительно постоянной скоростью ω .

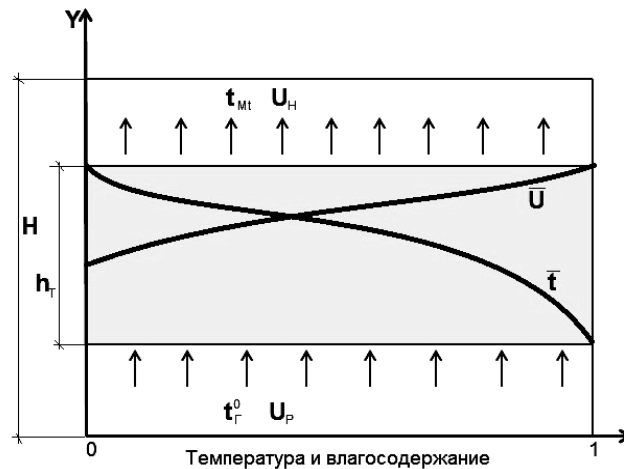


Рис. 4. Распределение влагосодержания и температуры в зоне тепло- и массообмена:

$$\bar{U} = \frac{U - U_P}{U_M - U_P}; t = \frac{t - t_{MT}}{t_{\Gamma}^0 - t_{MT}}$$

Вскрытый в экспериментах механизм процесса тепловой обработки минераловатного ковра был положен в основу методики расчета ее продолжительности. Общая продолжительность тепловой обработки материала τ , складывается из времени формирования зоны теплообмена τ_1 , времени перемещения зоны по толщине ковра τ_2 и времени, необходимого для завершения поликонденсации связующего τ_3 :

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3, \text{ с.}$$

За период формирования зоны теплообмена ковер прогревается от температуры окружающей среды t_0 до температуры мокрого термометра t_{MT} , а наружный слой – до температуры входящего теплоносителя t_{Γ}^0 . Величина τ_1 определяется следующим образом:

$$\tau_1 = \frac{\rho(U_H r' + C_M(t_{\Gamma}^0 - t_0))}{\alpha_v(t_{\Gamma}^0 - t_0)}.$$

Объемный коэффициент теплообмена α_v определяют по ранее приведенным выражениям; r – теплоту испарения – по таблицам.

Время перемещения зоны теплообмена τ_2 зависит от толщины ковра H , м, и скорости перемещения зоны теплообмена ω :

$$\tau_2 = \frac{H}{\omega}.$$

Из уравнения теплового баланса, составленного для зоны теплообмена, получается зависимость для определения скорости перемещения зоны ω :

$$\omega = \frac{c_T v \rho_T (t_{\Gamma}^0 - t_{MT})}{\rho [U_H r' + c_M (t_{\Gamma}^0 - t_{MT})]},$$

где

$$r' = r \left[1 + \frac{c_M (t_{MT} - t_0)}{U_H r} \right];$$

$$r = r_0 + c_n t_{MT} - c_B t_c.$$

Здесь r' – суммарная теплота испарения с учетом прогрева материала до температуры t_{MT} , кДж/кг; r_0 – скрытая теплота парообразования, кДж/кг; c_B, c_r, c_M, c_n – значения теплоемкости воды, теплоносителя, материала ковра, водяного пара, кДж/кг·°С; ρ_r^0 – плотность теплоносителя при t_r^0 , кг/м³.

Совместное решение уравнений, применительно к промышленным камерам (с учетом времени нагрева транспортирующих устройств), позволяет получить окончательную зависимость

$$\tau_2 = \frac{H_p \left[U_H r' + c_M (t_r^0 - t_{MT}) \right] + m_{тр} c_{тр} (t_r^0 - t_{тр}^{BX})}{v_r c_r \rho_r^0 (t_r^0 - t_{MT})},$$

где $t_{тр}^{BX}$ – температура транспортирующих устройств на входе в камеру, °С; $m_{тр}$ – масса 1 м² транспортирующих устройств, кг; $c_{тр}$ – теплоемкость транспортирующих устройств, кДж/кг·°С.

Расчетная зависимость для продолжительности изотермической выдержки τ_3 устанавливалась экспериментальным путем:

$$\tau_3 = 30,8 \cdot 10^3 \cdot \exp(-0,04 t_r^0).$$

При тепловой обработке минераловатного ковра со связующим нанесенным распылением, формирование зоны тепломассообмена происходит почти мгновенно. Расчетная зависимость для определения продолжительности тепловой обработки упрощается:

$$\tau_p = \frac{H_p \left[U_H r + c_M (t_r^0 - t_0) \right] + m_{тр} c_{тр} (t_r^0 - t_{тр}^{BX})}{v_r c_r \rho_r^0 (1 - a) t_r^0},$$

где $a = 1,1 - 0,0025 t_r^0$ – коэффициент, характеризующий температуру отходящих газов с учетом изотермической выдержки ковра для завершения поликонденсации связующего. Кинетика поликонденсации связующего отражена на рис. 5.

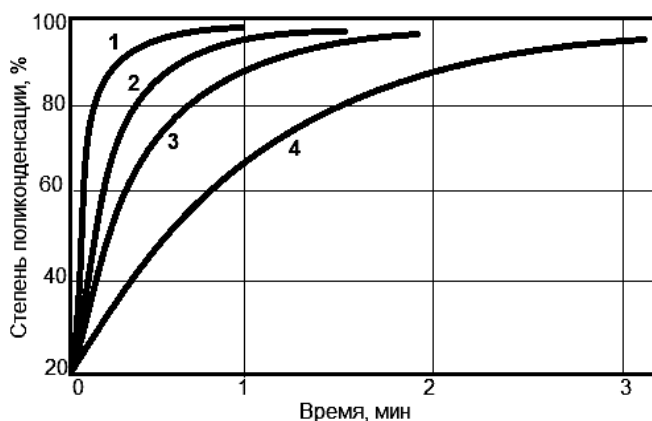


Рис. 5. Зависимость степени поликонденсации фенолоспиртов от продолжительности тепловой обработки и температуры теплоносителя, °С: 1 – 200; 2 – 180; 3 – 160; 4 – 140

С точки зрения объяснения кинетики нагрева и поликонденсации связующего в минераловатном ковре при тепловой обработке особый интерес представляет исследование зоны тепломассообмена. Замеряемые в экспериментах скорость перемещения зоны ω , ее высота h_T и остаточное влагосодержание в зависимости от температуры ковра позволили получить распределение влагосодержания и температуры в зоне тепломассообмена в относительных величинах \bar{U} и \bar{t} , как это показано на рис. 4. Установлено, что за

период формирования зоны, из нее удаляется 80...90 % начального содержания влаги.

Из уравнения теплового баланса, составленного для зоны тепломассообмена, получена зависимость для h_T , м:

$$h_T = \frac{v c_r \rho_r^0 (t_r^0 - t_{MT}) \tau_1}{\rho [(U_H - U_{cp}^{инт}) r' + c_M (t_{cp}^{инт} - t_{MT})]};$$

$$\bar{U} = \frac{U - U_P}{U_M - U_P}; \bar{t} = \frac{t - t_{MT}}{t_r^0 - t_{MT}}; \bar{h}_T = \frac{Y}{h_T}$$

где U_P – равновесное влагосодержание ковра, кг/кг; $U_{cp}^{инт} = (0,1-0,2)$ – среднеинтегральное значение влагосодержания в зоне тепломассообмена, кг/кг; $t_{cp}^{инт} = (0,6...0,65)t_{cp}$ – среднеинтегральное значение температуры, °С.

В период выхода зоны тепломассообмена из ковра интенсивность удаления влаги непрерывно падает. Продолжительность периода падающей скорости сушки определяют из соотношения: $\tau_4 = 1,2\tau_1$. Для упрощения расчетов аналитические и эмпирические зависимости переработаны и по ним построены номограммы (рис. 6).

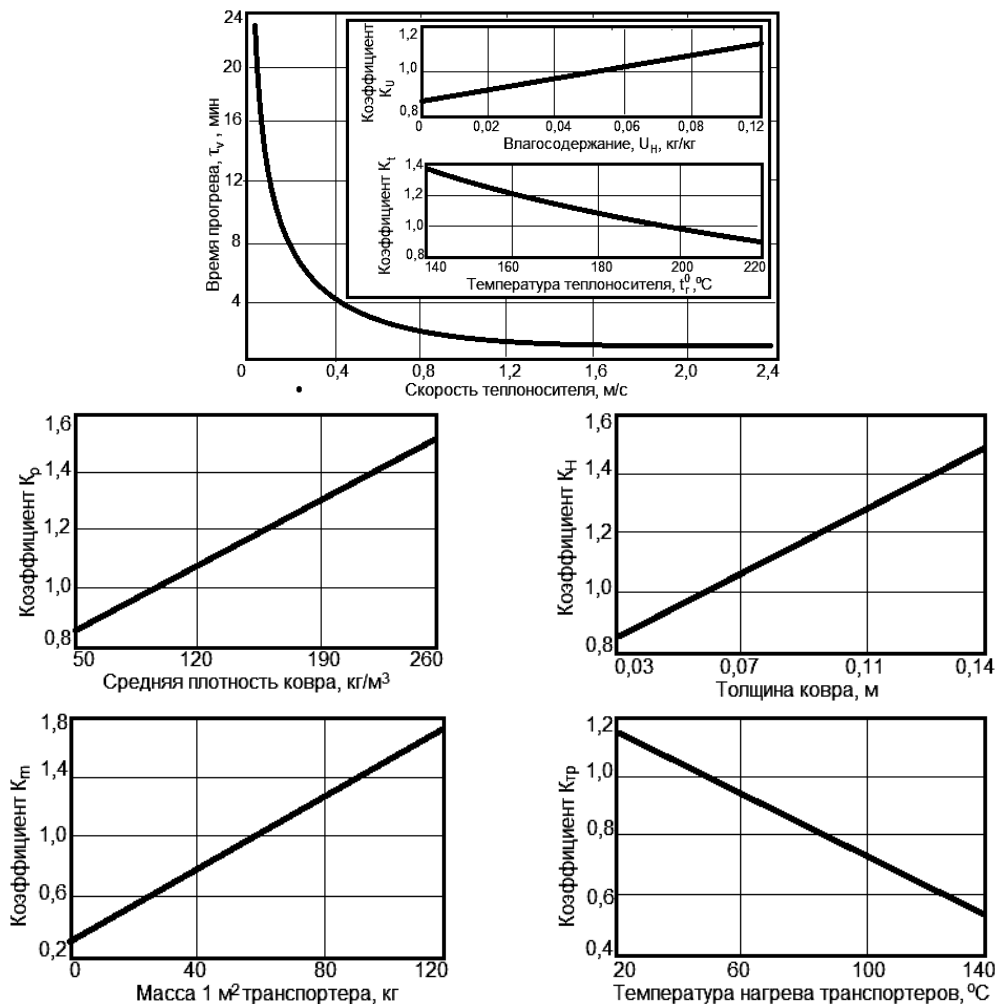


Рис. 6. Номограмма для определения продолжительности тепловой обработки минераловатного ковра. Формула для расчета: $\tau = \tau_v \cdot K_U \cdot K_t \cdot K_p \cdot K_H \cdot K_m \cdot K_v \cdot K_{t_e}$, $K_{t_e} = 1$ при $10 \leq t_0 \leq 30$

При температурах теплоносителя 180...200 °С (обычно применяемой в производстве) продолжительность изотермической выдержки незначительна (25...40 с) и общая продолжительность тепловой обработки регламентируется в основном временем сушки и прогрева минераловатного ковра. Следовательно, обеспечив соответствующие скорости продувки теплоносителя через материал, можно сократить время его тепловой обработки более чем в 2 раза. Эта методика удобна для расчета камер тепловой обработки и определения продолжительности технологического процесса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Окорокв А.М. Жуков Д.В. Исследование и расчёт процесса тепловой обработки минераловатного ковра методом продувки теплоносителя // Строительные материалы. 1982. № 7.
2. Курочкин В.А., Жуков Д.В., Шелепов Е.П. Моделирование промышленного режима конвективной сушки изделий в процессе эксперимента // Строительные материалы. 1979. № 1. С. 48.

REFERENCES

1. Okorokov A.M. Zhukov D.V. *Issledovanie i raschet protsessy teplovoy obrabotki mineralovatnogo kovra metodom produvki teponositelya*. [Research and Calculation of the Process of Mineral Wool Heat Treatment by the Blowoff of the Heat Carrier] *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials]. 1982, no 7.
2. Kurochkin V.A., Zhukov D.V., Shelepov E.P. *Modelirovanie promyshlennogo rezhima konvektivnoy sushki izdeliy v protsesse eksperimenta* [Modeling of the Industrial Mode of Convective Dehumidification of Products with the Framework of an Experiment]. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials], 1979, no 1, 48 p.

Поступила в редакцию в январе 2012 г.

Об авторах: **Жуков Алексей Дмитриевич**, доцент, кандидат технических наук, профессор кафедры технологии отделочных и изоляционных материалов, **ФГБОУ ВПО «МГСУ»**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, taurusj@rambler.ru;

Смирнова Татьяна Викторовна, аспирант **ФГБОУ ВПО «МГСУ»**, ведущий специалист компании РОКВУЛ, tatyana.smirnova@rockwool.ru

About authors: **Zhukov Alexei Dmitriuevich**, Assistant Professor, Candidate of Technical Science, Professor of finishing and insulating materials technology department, **Moscow State University of Civil Engineering (MSUCE)**, 26 Yaroslavskoye shosse, 129337, Moscow, Russian Federation, taurusj@rambler.ru;

Smirnova Tatyana Viktorovna, postgraduate **Moscow State University of Civil Engineering (MSUCE)**, 26 Yaroslavskoye shosse, 129337, Moscow, Russian Federation, Director, Department of Design and Technical Support, **Rockwool**, 9 Zemlyanoy val st., Moscow, 105064, Russian Federation, tatyana.smirnova@rockwool.ru

Для цитирования:

Жуков А.Д., Смирнова Т.В. Тепловая обработка минераловатного ковра // Научно-практический Интернет-журнал «Наука. Строительство. Образование». 2012. Вып. 1. Режим доступа: <http://www.nso-journal.ru>.

For citation:

Zhukov A.D., Smirnova T.V. *Teplovaya obrabotka mineralovatnogo kovra* [Thermal processing of mineral wool carpet]. *Nauchno-prakticheskiy Internet-zhurnal «Nauka. Stroitel'stvo. Obrazovanie»* [Science, construction, education], 2012, no. 1. Available at: <http://www.nso-journal.ru>.