

УДК 621.78

*А.Д. Жуков, Т.В. Смирнова,
А.О. Химич, А.О. Еременко,
Н.А. Копылов*

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОЙ ОБРАБОТКИ МИНЕРАЛОВАТНЫХ ИЗДЕЛИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭВМ

Свойства изделий во многом определяются условиями их тепловой обработки. Аналитическое и экспериментальное изучение тепловой обработки минераловатного ковра позволило выявить определяющие факторы и сформировать систему зависимостей между этими факторами и результирующими характеристиками. Эти зависимости стали основой алгоритма программ, объединенных в комплекс.

Программный комплекс предназначен для расчета гидравлического сопротивления минераловатного ковра при тепловой обработке, которая осуществляется прососом теплоносителя через слой минераловатного ковра, расположенного на перфорированном конвейере; для определения минимальной длины камеры тепловой обработки и времени тепловой обработки.

Ключевые слова: минеральная вата, компьютер, тепловая обработка, конвейер, плита двойной плотности.

*A.D. Zhukov, T.V. Smirnova,
A.O. Khimich, A.O. Eremenko,
N.A. Kopylov*

COMPUTER-BASED ANALYSIS OF THERMAL TREATMENT PARAMETERS APPLICABLE TO MINERAL WOOL PRODUCTS

Properties of mineral wool products are, to a significant extent, pre-set by conditions of their thermal treatment. The findings of analytical and experimental researches into patterns of thermal treatment of mineral wool carpets have been converted into dominant factors of influence used to compile a network of factor-to-factor dependencies and resulting characteristics. Dependencies derived in pursuance of the aforementioned pattern serve as the basis for the algorithm of software programmes integrated into a single software facility.

The software facility is designated for the analysis of the value of hydraulic resistance of a mineral wool carpet exposed to thermal treatment using the method of heat carrier blowing through the mineral wool carpet layer spread over the punched surface of the transporter. The software facility may be used to identify the minimal length of the thermal treatment chamber and the thermal treatment exposure time.

Key words: mineral wool, computer, thermal treatment, transporter, double density panel.

По действующему в России стандарту ГОСТ Р 52953—2008 «Материалы и изделия теплоизоляционные. Термины и определения» продукт, полученный из расплава горных пород, шлака или стекла, называется минеральной ватой [1]. Для получения минеральной ваты используются горные породы габбро-базальтового типа и их аналоги, осадочные породы, вулканические шлаки, силикатные промышленные отходы, в т.ч. щебень из доменного шлака, кварцевый песок, стекло, а также смеси перечисленных компонентов и других сырьевых материалов [2]. Основные сферы применения жестких минераловатных плит в строительстве: теплоизоляция плоских кровель и системы фасадной теплоизоляции. Для таких плит регламентируется прочность на сжатие и/или отрыв слоев под равномерно распределенной нагрузкой.

Плиты из каменной ваты, имеющие комбинированную структуру, состоят из двух слоев, различающихся по плотности. Верхний слой плит имеет большую плотность — 190...210 кг/м³, нижний — меньшую — 110...135 кг/м³. Толщина верхнего слоя постоянна и составляет 15...20 мм, толщина нижнего слоя переменная в зависимости от общей толщины плиты. При этом слои, имеющие разную плотность, соединяются между собой в одно изделие за счет связующего компонента, содержащегося в общем минераловатном ковре. Все основные качественные характеристики деклари-

руются для плиты целиком. Данные плиты могут применяться для изоляции как в один слой, так и в качестве верхнего слоя в двухслойном решении. Тем не менее, плиты комбинированной структуры в основном применяются как альтернативное двухслойному однослойное решение.

Изготовление изделий двойной плотности базируется на технологических схемах изготовления изделий из каменной ваты. Технология плит из каменной ваты основана на использовании шихты с модулем кислотности $M_k = 1,8 \dots 2,2$; плавлением в ваннах печах или модернизированных вагранках; центробежно-валковым способом переработки расплава в волокно; получением ковра с помощью раскладчика и подпрессовщика (гофрировщика), с последующей тепловой обработкой ковра и форматирования его в изделия. В качестве связующего применяют нейтрализованные фенолоспирты [3].

Особенностью технологии плит двойной плотности является установка специального комплекса, схема которого приведена на рис. 1. Этот комплекс размещается в линейной технологической цепочке после подпрессовочного устройства и перед камерой тепловой обработки. Аналогичные устройства работают на линиях РОКВУЛ (заводы в г. Железнодорожном и Выборге) и ориентированы на изготовление кровельной теплоизоляции комбинированной структуры. Для изоляции, работающей в системах НВФ, требования несколько иные, чем для кровельной. В частности, для ветрозащиты, наружный слой должен быть более плотным, перераспределение нагрузок по толщине — незначительно и т.п. Конструкционные требования предполагают технологические изменения: условия подпрессовки, режимы тепловой обработки ковра двойной плотности. Эти изменения являются частными технологическими задачами и могут быть реализованы без нарушения параметров технологии в целом.

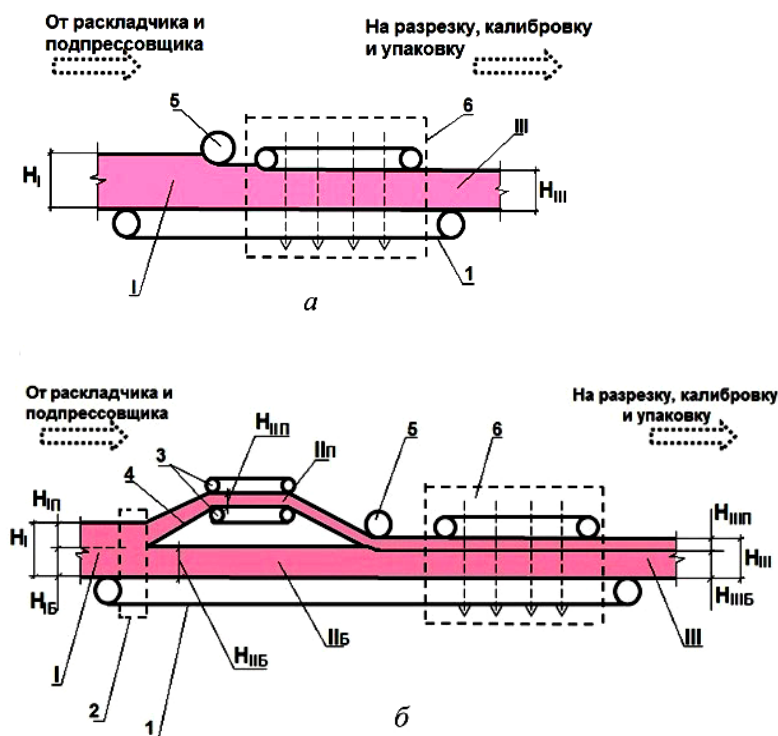


Рис. 1. Схемы изготовления плит: а — равной плотности; б — двойной плотности: I — минераловатный ковер после раскладчика и подпрессовщика; II_п — покровный слой (в процессе подпрессовки); II_б — базовый слой после разрезки; III — минераловатный ковер с отвержденным связующим после камеры тепловой обработки; 1 — сетчатый конвейер; 2 — резательное устройство; 3 — уплотняющие конвейеры; 4 — направляющий стол; 5 — подпрессовочное устройство; 6 — камера тепловой обработки

Процесс производства изделий определяется соответствующим технологическим регламентом, спонтанное вторжение в изменение параметров которого строго не рекомендуется. При этом свойства изделий во многом определяются условиями их тепловой обработки, которая осуществляется прососом теплоносителя сквозь слой ковra (рис. 2). Аналитическое и экспериментальное изучение тепловой обработки минераловатного ковra [4] позволило выявить определяющие факторы и сформировать систему зависимостей между этими факторами (табл.) и результирующими характеристиками [5]. Установлено, что процесс зависит от характеристик ковra (в т.ч. его слоев) и параметров управления, влияние которых оценивается с помощью программного комплекса для ЭВМ.

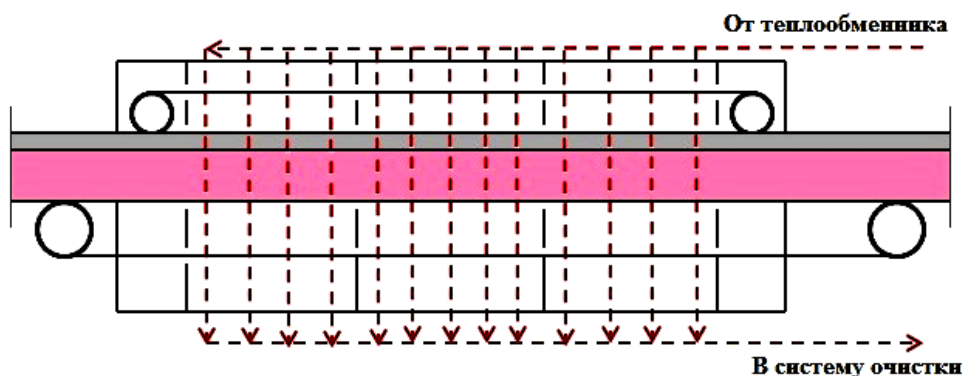


Рис. 2. Схема тепловой обработки минераловатного ковra

Характеристики для расчета параметров тепловой обработки

Характеристика	Ед. изм.	Индекс	Область определения
Скорость теплоносителя	м/с	X_1	[0,4; 1,8]
Содержание связующего	%	X_2	[0; 6]
Толщина слоя ковra	м	X_3	[0,03; 0,12]
Содержание корольков	%	X_4	[0; 10]
Средняя плотность ковra	кг/м ³	X_5	[50; 250]
Диаметр волокна	мкм	X_6	[3; 6]
Температура теплоносителя	°С	X_7	[40; 240]
Влагосодержание ковra	кг/кг	X_8	[0; 0,5]
Перфорация лент конвейера	%	X_9	[10; 60]
Масса 1 м ² транспортера	кг	X_{10}	[20;120]
Температура нагрева транспортера	°С	X_{11}	[20;140]
Степень неравноплотности ковra	%	X_{12}	[0; 50]
Производительность линии	кг/ч	X_{13}	[1500; 2500]

Гидравлическое сопротивление ковra переменной плотности ΔP_ϕ определяют по формуле

$$\Delta P_\phi = \Delta P_0 K_\varepsilon = K_\varepsilon \sum_{i=1}^n \Delta P_i,$$

где ΔP_0 — гидравлическое сопротивление минераловатного ковra, кПа; K_ε — коэффициент, учитывающий перфорацию лент конвейера; ΔP_i — гидравлическое сопротивление i -го слоя, кПа; i — количество слоев.

Гидравлического сопротивление i -го слоя ΔP_i определяют по формуле

$$\Delta P_i = \Delta P K_0 K_{Hi} K_{\rho i},$$

где ΔP — гидравлическое сопротивление минераловатного ковра со связующим введенным методом распыления при заданной скорости продувки теплоносителя, кПа; K_0 — коэффициент постоянных свойств; K_{Hi} — коэффициент, учитывающий толщину i -го слоя; $K_{\rho i}$ — коэффициент, учитывающий среднюю плотность i -го слоя.

Коэффициенты K_{Hi} и $K_{\rho i}$ определяют расчетом на ЭВМ. Так как ковер первоначально был единым, то коэффициент постоянных свойств K_0 считается равным для каждого из слоев. Коэффициент K_0 рассчитывают по формуле

$$K_0 = K_{\rho T} K_X K_C K_d K_t K_u,$$

где K_X — коэффициент, учитывающий содержание неволоконистых включений (корольков); K_C — коэффициент, учитывающий содержание связующего; K_d — коэффициент, учитывающий диаметр волокон; K_t — коэффициент, учитывающий температуру теплоносителя; K_u — коэффициент, учитывающий влагосодержание минераловатного ковра.

Определение продолжительности тепловой обработки минераловатного ковра τ осуществляют по формуле

$$\tau = \max(\tau_i),$$

где τ_i — продолжительность тепловой обработки i -го слоя минераловатного ковра, определяемая по формуле

$$\tau_i = K'_0 \tau_v K'_H K'_\rho,$$

где τ_v — продолжительность прогрева при установленной скорости теплоносителя, мин; $K'_H K'_\rho$ — коэффициенты, учитывающие толщину и плотность i -го слоя минераловатного ковра; K'_0 — коэффициент постоянных свойств определяется по формуле

$$K'_0 = K'_u K'_t K'_m K'_{\text{тр}} K'_{t_0},$$

где K'_u — коэффициент, зависящий от влагосодержания материала; K'_t — коэффициент, зависящий от температуры теплоносителя; K'_m — коэффициент, зависящий от массы 1 м^2 транспортера; $K'_{\text{тр}}$ — коэффициент, зависящий от температуры нагрева транспортеров; K'_{t_0} — коэффициент, зависящий от температуры в цехе: $K'_{t_0} = 1$ при $10 \leq t_0 \leq 30$.

Из всех рассчитанных значений τ_i выбирают максимальное и его принимают за длительность тепловой обработки. Подобный подход к выбору времени тепловой обработки определяется условием неразрывности потока, принятым в теории гидродинамики капельных и сжимаемых жидкостей. При этом учитывается, что часть потока тепла может пройти вне ковра за счет недостатков в устройствах камер (неплотностях разделительных зон или между конвейером и стенками камеры). В общем случае эти потери можно минимизировать сосредоточенным подводом теплоносителя.

Определение минимальной длины конвейерной камеры L_{\min} осуществляется по формуле

$$L_{\min} = \sum_{i=n}^n L_{\min(i)},$$

где n — количество слоев; $L_{\min(i)}$ — длина, камеры, необходимая для прогрева i -го слоя минераловатного ковра установленной плотности до заданной температуры,

$$L_{\min(i)} = L_i K_0'' K_{Hi},$$

где K_{Hi} — коэффициент, зависящий от толщины i -го слоя; K_0'' — коэффициент постоянных свойств, рассчитываемый по формуле

$$K_0'' = K_t'' K_v K_{\delta H} K_u'',$$

где K_t'' — коэффициент, зависящий от температуры теплоносителя; K_v — коэффициент, зависящий от скорости теплоносителя; $K_{\delta H}$ — коэффициент, зависящий от степени неравноплотности ковра; K_u'' — коэффициент, зависящий от начального влагосодержания ковра.

Программный комплекс реализован для ПК на базе процессора Intel×86 или AMD 64 в системе Microsoft Windows XP и выше; программы составлены на языке C#. Для стабильной работы программ необходима платформа Microsoft.Net Framework 4.0. Программы осуществляют расчет коэффициентов, зависящих от параметров технологического процесса, исходных свойств минераловатного ковра и характеристик теплоносителя.

Алгоритм, общий для всех программ, приведен на рис. 3. Программы осуществляют расчет коэффициентов, зависящих от параметров технологического процесса, исходных свойств слоев минераловатного ковра и характеристик теплоносителя (см. табл.). С учетом этих коэффициентов определяют значения результирующих функций.

Программа WD-22 осуществляет расчет гидравлического сопротивления каждого слоя слоистого минераловатного ковра. Общее гидравлическое сопротивление минераловатного ковра, состоящего из двух и более слоев, находят суммированием гидравлических сопротивлений отдельных слоев.

Программа WD-28 осуществляет расчет длины камеры тепловой обработки слоистого минераловатного ковра. С учетом коэффициентов и заданной производительности линии определяется минимальная длина камеры тепловой обработки по каждому слою ковра. Общая длина камеры находится как сумма значений длин по каждому слою.

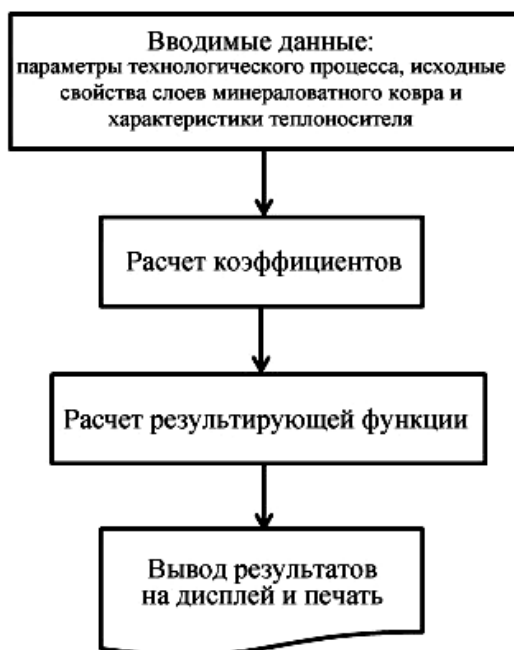


Рис. 3. Алгоритм расчета параметров тепловой обработки минераловатного ковра

Программа WD-25 осуществляет расчет продолжительности тепловой обработки слоистого минераловатного ковра. С учетом коэффициентов, зависящих от параметров технологического процесса, исходных свойств слоев минераловатного ковра и характеристик теплоносителя, определяется время, необходимое на тепловую обработку каждого слоя минераловатного ковра: испарение из них воды и отверждение связующего. Общее время тепловой обработки определяют как максимальное из времен тепловой обработки каждого из слоев.

Программа WD-22 может быть использована при определении гидравлического сопротивления минераловатных изделий, работающих в системе вентилируемых фасадов, WD-28 — для определения длин камер тепловой обработки любых материалов на основе минеральных и органических волокон. Программы позволяют решать интерполяционные и адаптационные задачи технологического моделирования, а также оптимизировать режимы тепловой обработки слоистого минераловатного ковра.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Жуков А.Д., Боброва Е.Ю., Смирнова Т.В., Гудков П.К. Повышение эффективности минераловатных изделий : монография. М. : МГСУ, 2012. 160 с.
2. Румянцев Б.М., Жуков А.Д. Методология создания новых строительных материалов. М. : МГСУ, 2012. 170 с.
3. Румянцев Б.М., Жуков А.Д. Эксперимент и моделирование при создании новых изоляционных и отделочных материалов : монография. М. : МГСУ, 2012. 170 с.
4. Жуков А.Д., Смирнова Т.В., Чугунков А.В. Перенос тепла в высокопористых материалах // Интернет-Вестник ВолгГАСУ. 2012. № 3. Режим доступа: <http://vestnik.vgasu.ru/>.
5. Жуков А.Д., Смирнова Т.В., Гудков П.К. Тепловая обработка минераловатного ковра двойной плотности // Интернет-Вестник ВолгГАСУ. 2012. № 3. Режим доступа: <http://vestnik.vgasu.ru/>.

REFERENCES

1. Rumyantsev B.M., Zhukov A.D. *Metodologiya sozdaniya novykh stroitel'nykh materialov* [Methodology for Development of New Construction Materials]. Moscow, MGSU Publ., 2012, 170 p.
2. Rumyantsev B.M., Zhukov A.D. *Eksperiment i modelirovanie pri sozdanii novykh izolatsionnykh i otdelochnykh materialov* [Experiment and Modeling as Part of Development of New Insulation and Finishing Materials]. Moscow, MGSU Publ., 2012, 170 p.
3. Zhukov A.D., Bobrova E.Yu., Smirnova T.V., Gudkov P.K. *Povyshenie effektivnosti mineralovatnykh izdeliy* [Improvement of Efficiency of Mineral Wool Products]. Moscow, MGSU Publ., 2012, 160 p.
4. Zhukov A.D., Smirnova T.V., Chugunkov A.V. *Perenos tepla v vysokoporistykh materialakh* [Heat Transfer inside Highly Porous Materials]. Internet-Vestnik VolgGASU. 2012, no. 3.
5. Zhukov A.D., Smirnova T.V., Gudkov P.K. *Teplovaya obrabotka mineralovatnogo kovra dvoynoy plotnosti* [Thermal Treatment of Double Density Mineral Wool Carpets]. Internet-Vestnik VolgGASU. 2012, no. 3.

Поступила в редакцию в марте 2013 г.

Об авторах: **Жуков Алексей Дмитриевич**, кандидат технических наук профессор кафедры технологии отделочных и изоляционных материалов **ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет» (ФГБОУ ВПО «МГСУ»)**, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, taurusj@rambler.ru;

Смирнова Татьяна Викторовна, руководитель отдела проектирования и технической поддержки, ЗАО «Минеральная вата», аспирант кафедры технологии отделочных и изоляционных материалов **ФГБОУ ВПО «Московский государственный**

About the authors: **Zhukov Aleksey Dmitrievich**, Candidate of Technical Sciences, Professor, Department of Technology of Finishing and Insulation Materials, **Moscow State University of Civil Engineering (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; taurusj@rambler.ru;

Smirnova Tat'yana Viktorovna, Director, Department of Design and Technical Support, ZAO «Mineral'naya vata», postgraduate student, Department of Technology of Finishing and Insulation Materials, **Moscow State University of Civil**

ный строительный университет» (ФГБОУ ВПО «МГСУ»), 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, tatyana.smirnova@rockwool.ru;

Химич Анастасия Олеговна, студент IV курса Института строительства и архитектуры, ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет» (ФГБОУ ВПО «МГСУ»), 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Khimichanastasia@gmail.com;

Еременко Александр Андреевич, студент III курса Института экономики, управления и информационных систем в строительстве и недвижимости, ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет» (ФГБОУ ВПО «МГСУ»), 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, erema1661@yandex.ru;

Копылов Никита Андреевич, студент III курса Института экономики, управления и информационных систем в строительстве и недвижимости, ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет» (ФГБОУ ВПО «МГСУ»), 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, nik.kopiloff@yandex.ru

il Engineering (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; tatyana.smirnova@rockwool.ru;

Khimich Anastasiya Olegovna, student, Institute of Civil Engineering and Architecture, **Moscow State University of Civil Engineering (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Khimichanastasia@gmail.com;

Eremenko Aleksandr Andreevich, student, Institute of Economics, Management and Information Systems in Civil Engineering and Real Estate **Moscow State University of Civil Engineering (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; erema1661@yandex.ru;

Kopylov Nikita Andreevich, student, Institute of Economics, Management and Information Systems in Civil Engineering and Real Estate **Moscow State University of Civil Engineering (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; nik.kopiloff@yandex.ru.

Для цитирования:

Расчет параметров тепловой обработки минераловатных изделий с применением ЭВМ / А.Д. Жуков, Т.В. Смирнова, А.О. Химич, А.О. Еременко, Н.А. Копылов // Строительство: наука и образование. 2013. Ст. 4. Режим доступа: <http://www.nso-journal.ru>.

For citation:

Zhukov A.D., Smirnova T.V., Himich A.O., Erjomenko A.A., Kopylov N.A. Computer-based analysis of thermal treatment parameters applicable to mineral wool products // *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education], 2013, no. 1, paper 4. Available at: <http://www.nso-journal.ru>.