

УДК 532.5 + 677.5

*А.Д. Жуков, Т.В. Смирнова***ГИДРОДИНАМИКА ПОТОКА  
ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ  
В МИНЕРАЛОВАТНОМ КОВРЕ**

Гидравлическое сопротивление минераловатного ковра и гидравлическое сопротивление изделий является параметром важным как для решения технологических задач, так и для оценки эксплуатационных свойств изделий и их долговечности.

Гидравлическое сопротивление минераловатного ковра (изделия) прямо пропорционально поверхности волокон на единицу объема слоя и обратно пропорционально третьей степени пористости слоя и зависит от диаметра волокон, содержания неволоконистых включений, скорости продувки, средней плотности, и толщины ковра. Изменение влажности минераловатного ковра до 25 % практически не оказывает влияния на сопротивление ковра. Однако с увеличением влажности сопротивление ковра прохождению теплоносителя резко возрастает. При этом зависимость между влажностью ковра и его гидравлическим сопротивлением является линейной.

Экспериментальные исследования показывают, что сила сопротивления, возникающая при фильтрации пористого слоя, в общем виде выражается как некоторая функция числа  $Re$ . В соответствии разработанной методикой в качестве модели процесса приняты условия движения теплоносителя по системе каналов, образованных хаотично расположенными волокнами, корольками и связующим. В результате исследований получены корневые зависимости для расчета гидравлического сопротивления минераловатного ковра, которые для удобства инженерных расчетов приведены в номографический вид. При проектировании транспортных лент конвейера камеры, необходимо стремиться к повышению степени перфорации ленты и вводить поправочные коэффициент к гидравлическому сопротивлению слоя при расчете камер и выборе дутьевых устройств.

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

*A.D. Zhukov, T.V. Smirnova***HYDRODYNAMICS  
OF HEAT AGENT FLOW  
INSIDE A MINERAL WOOL MAT**

Hydraulic resistance of a mineral wool mat and other products is an important parameter both in terms of technology-related solutions and assessment of performance and durability of products.

Application of methodologies of calculations aimed at the identification of the hydraulic resistance is particularly important when identification of these parameters by means of an experiment is problematic.

In particular, research of characteristics of heat treatment of a double-density mineral wool mat gives integrated quantities only, whereas projection of properties of products and selection of their heat treatment parameters require the exact parameter for each layer. In this event, the proposed methodology is the sole instrument.

Hydraulic resistance of a mineral wool mat (a product) is in proportion to dimensions of surface fibers multiplied by the unit of volume of one layer, while it remains in inverse proportion to the cubed layer porosity. Hydraulic resistance of a mineral wool mat depends on the diameter of fibers, presence of nonfibrous inclusions, blasting speed, average density and mat thickness. Any mat humidity fluctuations within the limit of 25 % make almost no impact onto mat resistance. However, any higher humidity causes drastic growth of mat resistance to transmission of the heat carrier. Besides, relation between mat humidity and its hydraulic resistance is linear.

Experiments have proven that the resistance intensity that emerges in the course of the porous layer filtration may be represented in general as some function of  $Re$  number. In accordance with the proposed methodology, the model process represents a heat carrier motion pattern through a system of channels that are formed by chaotic fibers, beads and binding agents. As a result of the research, key dependencies were identified to find out the hydraulic resistance of a mineral wool mat. They were represented as nomographic values. Whenever transfer belts of a chamber are designed, tape perforation is to be intensified, while adjustment coefficients are to be applied to hydraulic resistance values of a layer whenever chambers are designed and wind facilities are selected.

*Key words:* fiber mat, hydraulic resistance, voids content, heat-transfer agent, Reynolds number.

Пространственный каркас минераловатного ковра состоит из беспорядочно расположенных волокон. Диаметр волокон равен 3...8 мкм, а длина

до 50 мм. В минераловатном ковре могут находиться не волокнистые включения размером до 0,1 мм.

Формирование минераловатного ковра из произвольно расположенных тонких волокон определяет высокоразвитую внутреннюю поверхность, достигающую  $30000 \text{ м}^2/\text{м}^3$  и пористость до 97 %. Этими факторами обеспечивается преимущество тепловой обработки методом продувки теплоносителя через слой минераловатного ковра.

Для закрепления жесткости и формы готовых изделий в минеральную вату вводят связующее вещество (как правило, синтетические смолы), которое распределяется на волокнах в виде тонких пленок 0,3-0,4 мкм и капелек в местах контакта волокон. Так же вводится замазливатель и, в некоторых случаях, гидрофобизатор.

Связующее вещество вносится в виде водных растворов, поэтому поступающий на тепловую обработку минераловатный ковер, в зависимости от способа введения связующего имеет влагосодержание от 0,01...0,07 кг/кг (метод распыления) и 0,7...1 кг/кг (метод пролива или из гидромассы). Большинство современных технологий подразумевает введение связующего методом распыления.

Процесс движения вязкой жидкости в пористой среде описывается системой дифференциальных уравнений Навье — Стокса и уравнений сплошности. Однако геометрическая структура пористой среды не определена. В частности, в минераловатном слое геометрическая структура зависит от диаметра и длины волокон, размеров, количества и формы неволокнистых включений, пористости и линейных размеров слоя.

Описать аналитически такую структуру не представляется возможным. В связи с этим уравнения движения вязкой жидкости в пористой среде, даже в наиболее простом случае, когда гидравлическое сопротивление определяется силами вязкости, не интегрируются до расчетных зависимостей. Теория подобия позволяет, не интегрируя дифференциальных уравнений, получить расчетные критериальные зависимости, определяющие различные процессы, в т.ч. и процесс движения жидкости в пористой среде.

Многочисленные экспериментальные исследования показывают, что сила сопротивления, возникающая при фильтрации пористого слоя, в общем виде выражается как некоторая функция числа  $Re$ .

При прочих равных условиях, гидравлическое сопротивление минераловатного ковра (изделия) прямопропорционально поверхности волокон на единицу объема слоя и обратно пропорционально третьей степени пористости слоя  $m'$ .

Принимая форму волокон в виде цилиндров (стержней круглого сечения), форму корольков в виде шаров, количество корольков в слое  $X$ , %, и количество связующего  $C_1$ , %, получим следующую формулу для подсчета удельной поверхности минераловатного ковра:

$$S = 2 \frac{\rho}{\rho_T} \left[ \left( 1 - \frac{X + C}{100} \right) \frac{2}{d_n} + \frac{3X}{100d_k} + 6 C_1 100 \right],$$

где  $\rho$  – плотность минераловатного слоя;  $\rho_T$  – плотность корольков и волокон.

Расчетный диаметр волокон  $d_n$  принимается не как средний арифметический  $d_b$ , а подсчитывается по формуле

$$d_n = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_i d_i,$$

где  $n_i$  — доля волокон диаметром  $d_i$ .

Пористость слоя  $m'$  подсчитывается по формуле

$$m' = 1 - \frac{\rho}{\rho_T}$$

Анализ экспериментальных данных (рис. 1) [1] показывает, что гидравлическое сопротивление слоя в зависимости от диаметра волокон  $d_b$ , содержания неволокнистых включений  $X$ , скорости продувки  $v$ , средней плотности  $\rho$ , и толщины  $H$  ковра может быть представлено зависимостью:

$$\Delta P = \frac{Av^n \rho^2 H}{d_R X},$$

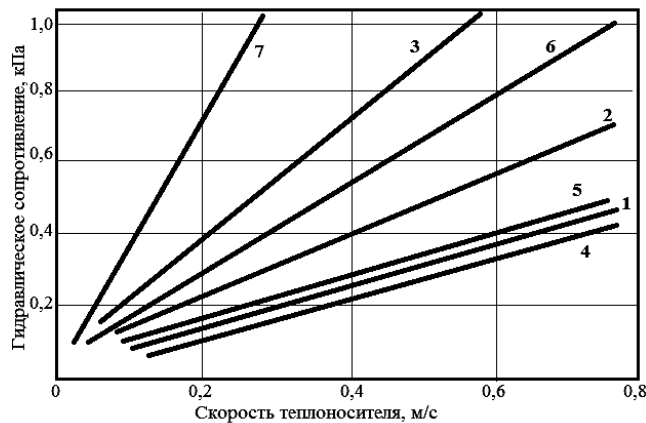


Рис. 1. Зависимость гидравлического сопротивления минераловатного ковра толщиной 50 мм от скорости продувки воздуха и диаметра волокна: 1, 2, 3 — 8 мкм; 4, 5, 6 — 6 мкм; 7 — 4 мкм; 1 — плиты плотностью 72 кг/м<sup>3</sup>; 2 — плиты плотностью 91 кг/м<sup>3</sup>; 3 — плиты плотностью 120 кг/м<sup>3</sup>; 4 — плиты плотностью 80 кг/м<sup>3</sup>; 5 — плиты плотностью 100 кг/м<sup>3</sup>; 6 — плиты плотностью 110 кг/м<sup>3</sup>; 7 — плиты плотностью 150 кг/м<sup>3</sup>

где  $A$  — переводной коэффициент ( $A = 0,18 \cdot 10^{-5}$ );  $n$  — показатель степени, зависящий от режима теплового потока. В инженерных расчетах  $n = 1$  при ламинарном режиме и  $v = 0,2 \dots 0,8$  м/с; и  $n = 1,4$  при переходном режиме и  $v = 0,8 \dots 2,0$  м/с. Для ламинарного режима формула приобретает вид

$$\Delta P = 0,18 \cdot 10^{-5} \frac{v \rho^2 H}{d_R} \left( 1 - \frac{X}{100} \right).$$

Температура продуваемого теплоносителя  $t$  оказывает влияние на его вязкость и плотность. С учетом этих факторов следует пользоваться формулой

$$\Delta P_t = \Delta P \left( \frac{\mu_t}{\mu_{20}} \right) \times \left( \frac{\rho_{г20}}{\rho_{гt}} \right)^k.$$

где  $\mu_{20}$ ,  $\mu_t$  — коэффициенты динамической вязкости при 20 °С и действительной температуре теплоносителя;  $\rho_{г20}$ ,  $\rho_{гt}$  — плотность теплоносителя (газа) при 20 °С и действительной температуре;  $k$  — эмпирический коэффициент.

Приведенные зависимости гидравлического сопротивления минераловатного ковра от его структурных характеристик скорости потока газа в слое и его температуры, хотя и допустимы при инженерных расчетах, но являются приближенными.

Для точного расчета гидравлического сопротивления минераловатного ковра не обходимо подсчитать значение критерия  $Re$  для принятой скорости потока в слое, установить величину коэффициента сопротивления  $f$  и подсчитать значение  $\Delta P$ :

$$Re = \frac{vl}{\nu}$$

$$f = \frac{72}{Re} + 0,8;$$

$$\Delta P = f \frac{v^2 \rho S H}{4 g m'^3} \psi.$$

Обработка экспериментальных данных по гидравлическому сопротивлению минераловатного ковра была применена Г.А. Ивановой [2]. Для минераловатного ковра средней плотностью 70...125 кг/м<sup>3</sup> был получен коэффициент формы  $\psi$ , равный 1,3.

Дальнейшим развитием стала методика Д.В. Жукова [1]. В соответствии с этой методикой в качестве модели процесса приняты условия движения теплоносителя по системе каналов, образованных хаотично расположенными волокнами, корольками и связующим. Толщина слоя принималась равной  $H$ . Истинная скорость в поровых трубках идеальной пористой структуры при скорости фильтрации  $v_\phi$  и пористости  $m'$  принималась равной

$$v = \frac{v_\phi}{m'}$$

Гидравлический диаметр поперечного сечения поровой трубки определяется формулой

$$d_{гид} = \frac{4m'}{S_{уд}}$$

С учетом этих зависимостей уравнение для гидравлического сопротивления слоя было представлено в виде

$$\Delta P = \xi \frac{H}{d_3 m'^2} \times \frac{\rho v^2}{2}.$$

Для коэффициента сопротивления  $\xi$  принята следующая зависимость:

$$\xi = \frac{A}{Re} + B.$$

Значение параметров  $A$ ,  $B$ ,  $\xi$  с погрешностью не более 18 % обобщаются следующими корреляционными зависимостями:

для минераловатного ковра со связующим, введенным распылением:

$$A = \frac{1,93}{(1 - m')^{2/3}}; \quad B = 7,12(1 - m')^{1/3}; \quad \xi = B \left( \frac{0,68}{Re_e} + 1 \right);$$

для минераловатного ковра из гидромасс:

$$A_\Gamma = \frac{10,9}{(1 - m')^{2/3}}; \quad B_\Gamma = 5,4(1 - m')^{1/3}; \quad \xi_\Gamma = B_\Gamma \left( \frac{0,515}{Re_e} + 1 \right).$$

Для ковра с большой средней плотностью  $\rho$  при одних и тех же значениях  $Re$   $\xi$  имеет меньшие значения. Объяснение этому можно найти в разной степени влияния на скорости потока теплоносителя  $v$  и удельной поверхности ковра  $S$ , зависящей от средней плотности.

После подстановки эмпирических уравнений в базовое и с учетом, что в диапазоне значений  $0,9 < m' < 0,98$  отношение  $\frac{(1 - m')^{1/3}}{m'^5}$  можно аппроксимировать с точностью до 13 % выражением  $3,6(1 - m')^{0,7}$  получим уравнения зависимости гидравлического сопротивления:

$$\Delta P = 3,2(1 - m')^{0,7} \left( \frac{0,68}{Re_e} + 1 \right) H S \rho v^2;$$

$$\Delta P_\Gamma = 2,43(1 - m')^{0,7} \left( \frac{0,47}{Re_e} + 1 \right) H S \rho v^2.$$

Если пренебречь поверхностью корольков и связующего материала, доля которых в общей поверхности минераловатного ковра не превышает 7 %, раскрыть выражения для  $S$  и  $Re_e$ , а так же учесть влияние на гидравли-

ческое сопротивление начального  $U_H$  и равновесного  $U_p$  влагосодержаний, то корневые зависимости приобретают вид

$$\Delta P_p = \frac{1,28}{d_b} \left(1 - \frac{X+C}{100}\right) \left(\frac{\rho}{\rho_T}\right)^{1,7} \left[\frac{2,72}{d_b} \left(1 - \frac{X+C}{100}\right) + \frac{v}{v}\right] \mu v H;$$

$$\Delta P_r = \frac{9,7}{d_b} \left(1 - \frac{X+C}{100}\right) \left(\frac{\rho}{\rho_T}\right)^{1,7} \left[\frac{2,06}{d_b} \left(1 - \frac{X+C}{100}\right) + \frac{v}{v}\right] \mu v H \exp 0,007 \frac{U}{U_p}.$$

Эти зависимости для удобства инженерных расчетов приведены в номографический вид (рис. 2).

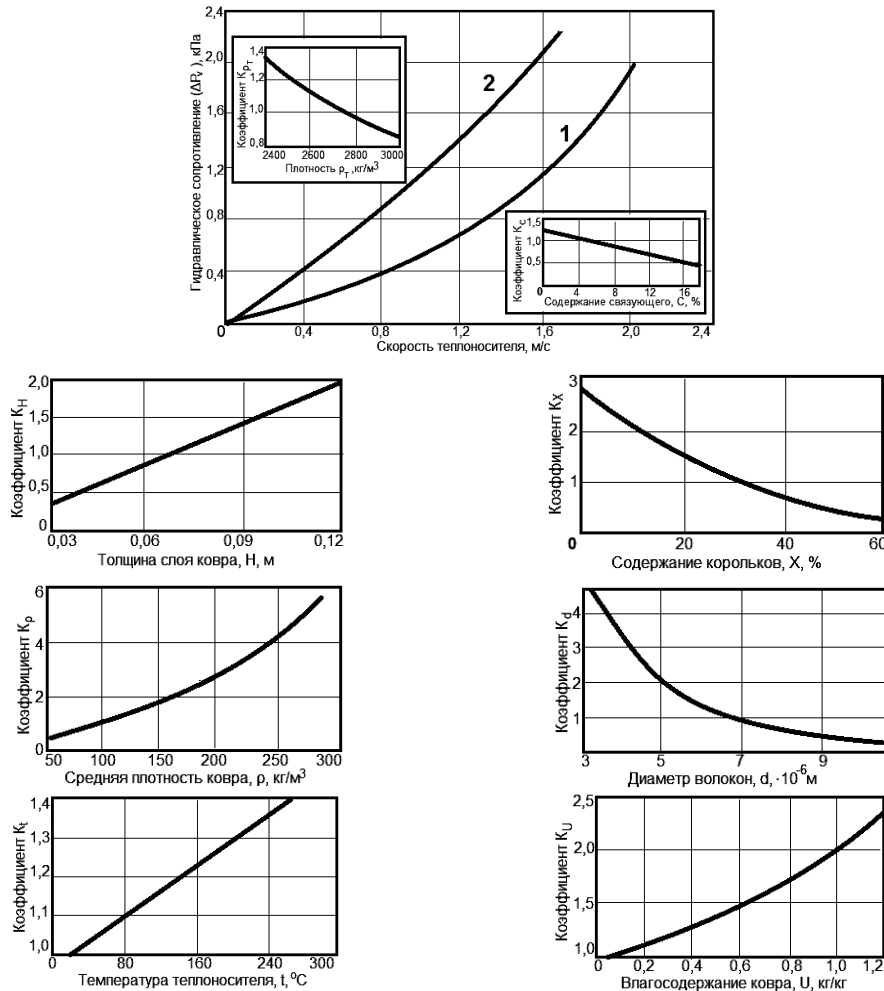


Рис. 2. Номограмма для определения гидравлического сопротивления минераловатного ковра: 1 — ковер со связующим, введенным методом распыления; 2 — ковер из гидромасс; расчетная формула:  $\Delta P = \Delta P_v \cdot K_{\rho T} \cdot K_p \cdot K_x \cdot K_c \cdot K_H \cdot K_d \cdot K_t \cdot K_u$

Влагосодержание ковра, при введении связующего методом распыления обычно находится в пределах  $U = 0,01 \dots 0,07$  кг/кг. В зависимости  $\Delta P_p$  отсутствует множитель, определяющий влияние влажности ковра, так как наличие влаги до  $U = 0,1$  кг/кг практически не влияет на гидравлическое сопротивление.

Изменение влажности минераловатного ковра до 25 % практически не оказывает влияния на сопротивление ковра. Однако с увеличением влажности при вводе связующего методом пролива с вакуумированием сопротивление ковра прохождению теплоносителя резко возрастает (рис. 3). При этом зависимость между влажностью ковра и его гидравлическим сопротивлением является линейной. Эти данные необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации камер тепловой обработки высоковлажных минераловатных изделий.

Гидравлическое сопротивление изделий зависит от степени перфорации лент конвейера. Данные, приведенные на рис. 4 показывают, что при плотности плит  $110 \text{ кг/м}^3$ , скорости продувки  $0,2-0,3 \text{ м/с}$  и степени перфорации лент конвейера  $30 \%$  гидравлическое сопротивление изменяется незначительно. При снижении степени перфорации до  $10 \%$  и особенно при одновременном увеличении плотности изделий и скорости продувки, гидравлическое сопротивление резко возрастает. Согласно кривым 4 и 5, при скорости продувки  $1 \text{ м/с}$  и перфорации  $10 \%$ , гидравлическое сопротивление возрастает с  $220$  до  $330 \text{ Па}$ . Из приведенных данных следует, что при проектировании транспортных лент конвейера камеры, необходимо стремиться к повышению степени перфорации ленты и вводить поправочные коэффициент  $K_\epsilon$  к гидравлическому сопротивлению слоя при расчете камер и выборе дутьевых устройств.

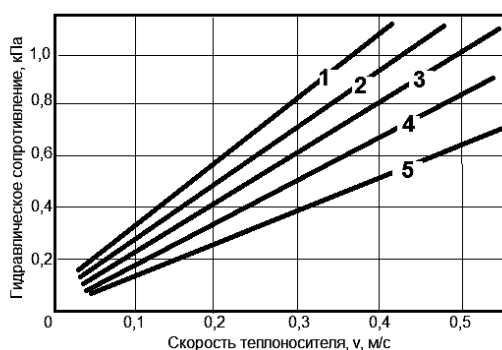


Рис. 3. Гидравлическое сопротивление минераловатного ковра в зависимости от скорости теплоносителя и влажности ковра: 1 — 150 %; 2 — 120 %; 3 — 100 %; 4 — 70 %; 5 — 0...25 %

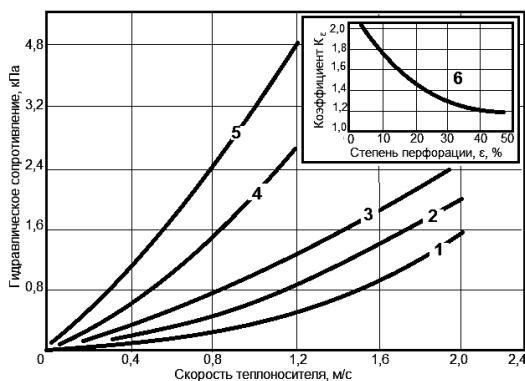


Рис. 4. Влияние перфорации лент конвейера или скалки на гидравлическое сопротивление минераловатного ковра: 1 — минераловатная плита плотностью  $110 \text{ кг/м}^3$ ; 2 — то же при перфорации ленты конвейера  $10 \%$ ; 3 — то же  $30 \%$ ; 4 — минераловатная плита плотностью  $180 \text{ кг/м}^3$ ; 5 — то же при перфорации ленты конвейера  $10 \%$ ; 6 — поправочный коэффициент  $K_\epsilon$  в зависимости от степени перфорации  $\epsilon$  для плиты плотностью  $110 \text{ кг/м}^3$

Применение расчетных методик определения гидравлического сопротивления минераловатного ковра особенно важно в тех случаях, когда затруднено экспериментальное определение этого параметра. В частности, при исследовании характеристик тепловой обработки минераловатного ковра двойной плотности можно получить только их интегральные величины. В то время как для прогнозирования свойств изделий и выбора параметров тепловой обработки важно знать параметры каждого из слоев. В этом случае подобная методика становится незаменимым инструментом.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Курочкин В.А., Жуков Д.В., Шелепов Е.П. Моделирование промышленного режима конвективной сушки изделий в процессе эксперимента // Строительные материалы. 1979. № 1. 48 с.
2. Иванова Г.А. Исследование технологии тепловой обработки минераловатных изделий на синтетических связующих : автореф. дисс. канд. техн. наук. М., 1972. 24 с.
3. Петров-Денисов В.Г., Масленников Л.А. Процессы тепло- и влагообмена в промышленной теплоизоляции. М. : Энергоиздат, 1983. 192 с.

## REFERENCES

1. 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.
2. Ivanova G.A. *Issledovanie tekhnologii teplovoy obrabotki mineralovatnykh izdeliy na sinteticheskikh svyazuyushchikh*. [Research of Technology of Heat Treatment of Mineral Wool Products Based on Synthetic Binders], Moscow, 1972, 24 p.
3. Petrov-Denisov V.G., Maslennikov L.A. *Protsessy teplo- i vlagoobmena v promyshlennoy teploizolyatsii* [Processes of Heat and Moisture Exchange in Industrial Thermal Insulation], Moscow, Energoizdat Publ., 1983, 192 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 Dmitrievich**, 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.* Гидродинамика потока теплоносителя в минераловатном ковре // Научно-практический Интернет-журнал «Наука. Строительство. Образование». 2011. Вып. 2. Режим доступа: <http://www.nso-journal.ru>.

For citation:

*Zhukov A.D., Smirnova T.V.* *Gidrodinamika potoka teplonositelya v mineralovatnom kovre* [Hydrodynamics of heat agent flow inside a mineral wool mat]. *Nauchno-prakticheskiy Internet-zhurnal «Nauka. Stroitel'stvo. Obrazovanie»*. [Science, construction, education], 2012, no 1. Available at: <http://www.nso-journal.ru>.