

УДК 699.865

**И.В. Бурдышев, А.В. Казаков**Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь, Россия**АНАЛИЗ ТЕПЛОЭФФЕКТИВНОСТИ СТЕНОВЫХ  
КОНСТРУКЦИЙ**

Рассмотрена стеновая конструкция, построенная по технологии несъемной опалубки. Исследуется стена, состоящая из опалубки, бетона и слоя утеплителя. Сама опалубка нужна для формообразования бетонной смеси. Данная технология означает, что опалубка после заливки бетона остается как часть готовой конструкции и может выполнять функции утепления, шумоизоляции и т.п. Целью работы являются анализ теплоэффективности различных материалов такой стены, а также оценка влияния некоторых ее элементов на теплопроводность. При решении такой задачи были использованы методы моделирования и последующий анализ. Для моделирования применена многофункциональная компьютерная программа ANSYS, предназначенная для решения задач механики, теплопередачи, электродинамики и других сфер науки. Программа основана на методе конечных элементов. В экспериментальной части работы были сравнены два материала опалубки, это опилкобетон и гиперпрессованный кирпич. Проведены сравнения теплоизолирующих свойств трех различных утеплителей: минеральной ваты, экструдированного пенополистирола и засыпного утеплителя – керамзита. Затем рассмотрено влияние на теплопроводность поперечных перегородок опалубки, сделанных из разных материалов. Также была предпринята попытка уменьшить тепловые потери в стене за счет определенного расположения элементов. В результате работы получены температурные поля, построены температурные графики и диаграммы, посчитаны тепловые потоки, проходящие через конструкции различной конфигурации, сделаны выводы о том, как влияет тот или иной материал или часть стены на теплопроводность. Результаты данной работы могут быть полезны при проектировании более теплоэффективных конструкций.

**Ключевые слова:** несъемная опалубка, теплоэффективность, моделирование, анализ.

**I.V. Burdyshev, A.V. Kazakov**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**ANALYSIS OF HEAT EFFICIENCY OF WALL CONSTRUCTIONS**

In this paper we consider a wall construction constructed using the technology of non-removable formwork. The wall consisting of a formwork, concrete and a layer of a heater is investigated. Formwork itself is needed to form a concrete mixture. This technology means that the formwork after casting of concrete remains as a part of the finished structure and can perform the functions of insulation, noise insulation, etc. The purpose of the work is to analyze the heat efficiency of various materials of such a wall, as well as to assess the influence of some of its elements on the thermal conductivity. In solving this problem, modeling methods and subsequent analysis were used. For modeling, the multi-functional computer program ANSYS, intended for solving problems of mechanics, heat transfer, electrodynamics and other fields of science, has been applied. The program is based on the finite element

method. In the experimental part of the work, two formwork materials were compared, this is sawdust concrete and hyperpressed brick. The thermal insulation properties of three different heaters are compared: mineral wool, extruded polystyrene foam and a backfill insulation - expanded clay. Then, the influence on the thermal conductivity of the transverse walls of the formwork made of different materials is considered. An attempt was also made to reduce the thermal losses in the wall due to a certain arrangement of the elements. As a result of the work, temperature fields were obtained, temperature graphs and diagrams were constructed, thermal flows were calculated through constructions of various configurations, conclusions were drawn about how this or that material or part of the wall affects the thermal conductivity. This work can be useful in the design of more heat-efficient structures.

**Keywords:** non-removable formwork, heat efficiency, modeling, analysis.

**Введение.** Энергоэффективность подразумевает под собой уменьшение потребления энергии за счет более рационального ее использования. В современном мире данная тема становится все более актуальной в связи с ограниченностью природных ресурсов, повышением цен на энергоресурсы, а также ухудшающейся экологической ситуацией. На сегодняшний день все большей популярностью при малоэтажном строительстве пользуется технология, в которой стены возводятся из блоков несъемной опалубки. Такая технология позволяет возводить здания за короткие промежутки времени.

Несъемная опалубка – это конструкция для заливки в нее бетонной смеси, которая остается как часть готовой конструкции (фундамента, стены, перекрытия и т.п.) и может выполнять функции утепления, шумоизоляции и др. [1, 2].

В данной работе рассмотрена стена, состоящая из опалубки, бетона и утеплителя. Также были рассмотрены некоторые виды материалов для такой стены.

Предметом исследования стала энергоэффективность данной конструкции.

Цель работы – определение влияния тех или иных элементов стены, имеющих различные характеристики, на ее энергоэффективность.

Методом исследования в данной работе являются моделирование и последующий анализ полученных результатов. Для моделирования применена многофункциональная программа ANSYS. Данная программа пользуется популярностью у специалистов в области инженерных расчетов. Она предназначена для решения задач механики, теплопередачи, электродинамики и других сфер науки. В ней используется метод конечных элементов. Метод основан на идее аппроксимации непрерывной функции дискретной моделью, которая строится на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе подобластей [3, 4, 5].

Практическая значимость исследования заключается в возможности использовать полученные результаты для проектирования более энергоэффективных конструкций.

**1. Анализ энергоэффективности материалов опалубки.** В данной работе для исследования была выбрана конструкция стены, состоящей из блоков несъемной опалубки, в которых есть отдельный слой утеплителя.

Приводится сравнение теплоизолирующих свойств двух материалов блоков несъемной опалубки. Это гиперпрессованный кирпич и опилкобетон. В качестве утеплителя был выбран экструдированный пенополистирол. Для сравнения материалов опалубки была выбрана упрощенная конструкция стены, состоящая из однородных слоев. Был рассмотрен тонкий кусочек стены, так как в такой стене изменение температуры будет только в направлении оси  $x$  (рис. 1).

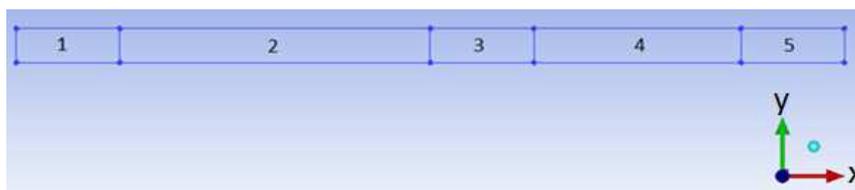


Рис. 1. Часть стенки: 1, 3, 5 – стенки опалубки; 2 – бетон; 4 – утеплитель

Толщина стенок опалубки 50 мм, толщина бетона 150 мм, толщина утеплителя 100 мм. На границе стены слева заданы конвекция с коэффициентом теплоотдачи  $10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  и температура  $+20 \text{ }^\circ\text{C}$ , справа температура  $-30 \text{ }^\circ\text{C}$ , коэффициент теплоотдачи  $10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

Теплофизические характеристики материалов представлены в табл. 1 [6, 7, 8].

Таблица 1

Теплофизические характеристики материалов

Характеристики	Гиперпрессованный кирпич	Опилкобетон	Бетон	Экструдированный пенополистирол
Плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$	1650	600	2300	40
Теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{ }^\circ\text{C})$	1172	2300	840	1300
Теплопроводность, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{ }^\circ\text{C})$	0,816	0,12	1,5	0,03

В ходе решения задачи были получены результаты эксперимента. Распределение температуры представлено на рис. 2.

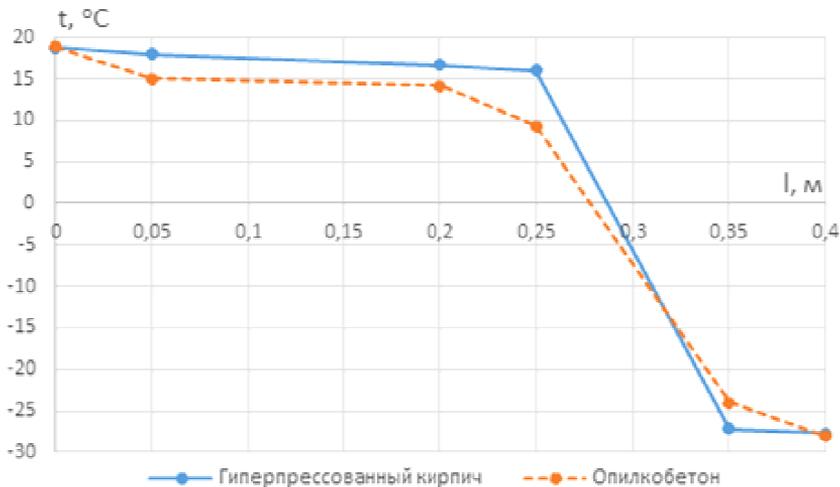


Рис. 2. Распределение температуры в стенке

По формуле Ньютона–Рихмана для плоской стенки можно найти плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>:

$$q = \alpha(t_{\text{ж}} - t_{\text{с}}), \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $t_{\text{с}}$  – температура стенки, °C;  $t_{\text{ж}}$  – температура жидкости, °C [9].

Для стенки с опалубкой из опилкобетона

$$q = 10(20 - 18,93) = 10,7 \text{ Вт/м}^2.$$

Для стенки с опалубкой из гиперпрессованного кирпича

$$q = 10(20 - 18,73) = 12,7 \text{ Вт/м}^2.$$

Анализируя полученные результаты, можно прийти к выводу, что у опилкобетона лучше теплоизоляционные свойства. Это видно, исходя из графиков распределения температуры, на которых у данного материала наблюдается больший перепад температуры. Поток тепла через стенку данной конструкции с материалом опалубки из гиперпрессованного кирпича больше на 17,6 %, чем поток тепла через стенку с материалом опалубки из опилкобетона.

**2. Анализ энергоэффективности утеплителей.** Во втором эксперименте приводится сравнение влияния на теплоизолирующие свойства стены из трех различных утеплителей. Это экструдированный пенополистирол, минеральная вата и засыпной утеплитель – керамзит.

Также была выбрана упрощенная конструкция стены, состоящая из однородных слоев (см. рис. 1).

Материал опалубки – опилкобетон. Толщина перегородок блока 50 мм, бетонного блока 150 мм. Также сравниваются три толщины утеплителя: 50, 100, 150 мм. На левой границе заданы конвекция с коэффициентом теплоотдачи  $10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  и температура  $+20 \text{ }^\circ\text{C}$ , на правой температура  $-30 \text{ }^\circ\text{C}$ , коэффициент теплоотдачи  $10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

Теплофизические характеристики материалов представлены в табл. 2 [10].

Таблица 2

Теплофизические характеристики утеплителей

Характеристики	Минеральная вата	Керамзит	Экструдированный пенополистирол
Плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$	100	600	40
Теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{ }^\circ\text{C})$	1000	840	1300
Теплопроводность, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{ }^\circ\text{C})$	0,056	0,14	0,03

В результате было получено распределение температуры для трех вариантов утеплителей и толщин. Исходя из полученных данных, по формуле (1) вычислена плотность теплового потока. Результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3

Плотность теплового потока

Толщина утеплителя, м	Плотность теплового потока $\text{Вт}/\text{м}^2$		
	Экструдированный пенополистирол	Минеральная вата	Керамзит
0,05	15	20,2	21,8
0,1	10,7	14,6	15,6
0,15	8,3	12,1	13,6

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что утеплитель из экструдированного пенополистирола более энергоэффективен, тепловой поток через него меньше. Утеплитель из керамзита хуже остальных утеплителей. При толщине утеплителя 5 см не промерзает только утеплитель из экструдированного пенополистирола. Если срав-

нить с экструдированным пенополистиролом минеральную вату и керамзит, при толщине утеплителя 10 см, для стены данной конфигурации из минеральной ваты теплопроводность на 36 % выше, а для керамзита выше на 46 %. Также можно заметить, что при увеличении толщины утеплителя с 5 до 10 см тепловой поток уменьшается сильнее, чем при увеличении толщины утеплителя с 10 до 15 см.

**3. Анализ энергоэффективности стены с перегородками.** В отличие от упрощенной конструкции стены, состоящей из однородных слоев, реальная стена из блоков несъемной опалубки имеет перегородки, соединяющие слои между собой.

Определяется влияние перегородок в стене на теплопроводность. Для исследования выбрана часть стены с такими перегородками.

Сравниваются также два вида материала опалубки: опилкобетон и гиперпрессованный кирпич. Толщина стенок опалубки 50 мм. Размеры бетонного ядра: 150×175 мм. Размеры утеплителя: 100×175 мм. Материал утеплителя – экструдированный пенополистирол.

На одной границе задана конвекция с температурой +20 °С и коэффициентом теплоотдачи 10 Вт/(м<sup>2</sup>·К), на другой границе также задана конвекция с коэффициентом теплоотдачи 10 Вт/(м<sup>2</sup>·К), но с температурой –30 °С.

После необходимых расчетов для опалубки из опилкобетона были получены результаты распределения температуры (рис. 3).

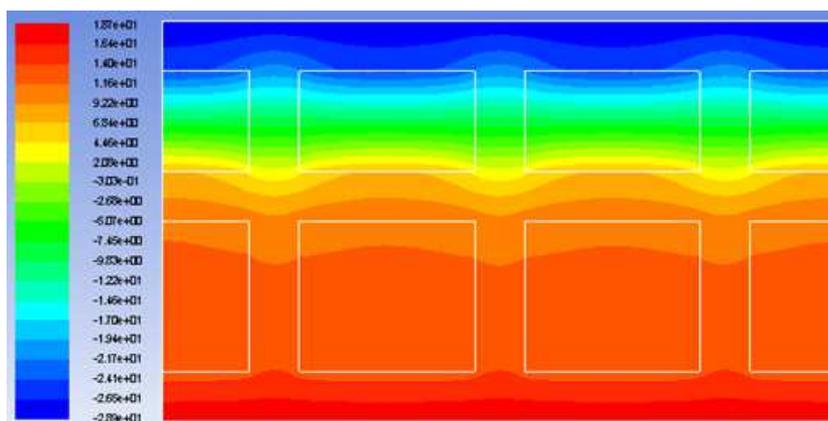


Рис. 3. Температурное поле стены с опалубкой из опилкобетона

Для стены с материалом опалубки из гиперпрессованного кирпича результаты исследования представлены на рис. 4.

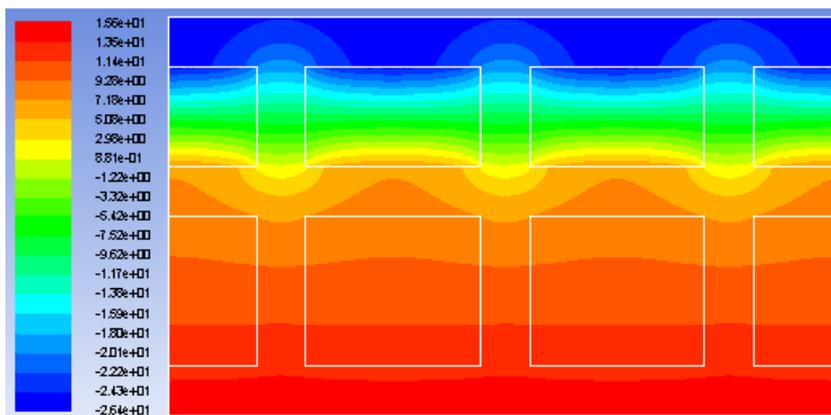


Рис. 4. Температурное поле стены с опалубкой из гиперпрессованного кирпича

Исходя из полученных данных распределения температуры, была рассчитана плотность теплового потока через данные конструкции по формуле (1). Результаты представлены в табл. 4.

Таблица 4

Плотность теплового потока с перегородками и без них

Конструкция	Плотность теплового потока, Вт/м <sup>2</sup>	
	Гиперпрессованный кирпич	Опилкобетон
Без перегородок	12,7	10,7
С перегородками	44,2	12,6

Для наглядности плотность теплового потока представлена в виде диаграммы на рис. 5.

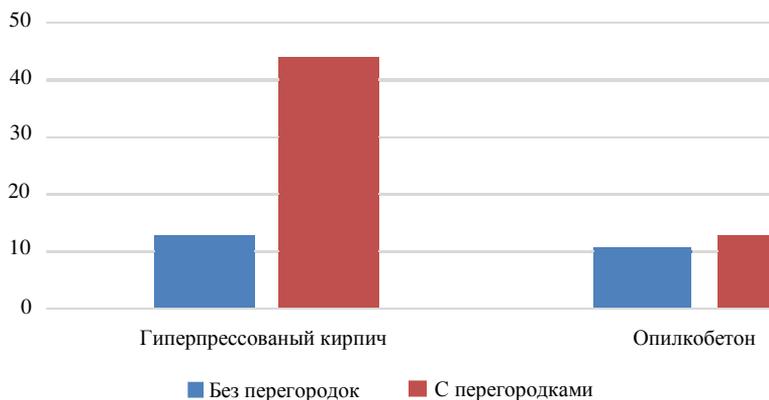


Рис. 5. Диаграмма плотности теплового потока

В результате расчетов можно прийти к выводу, что наличие перегородок в блоке из опилкобетона несущественно увеличивает теплопроводность конструкции, она увеличивается на 12 %. Однако для стены с блоками из гиперпрессованного кирпича наличие перегородок увеличивает теплопроводность конструкции в 3,5 раза.

**5. Анализ энергоэффективности стены с расположением бетона и утеплителя в шахматном порядке.** Наличие перегородок в конструкции стены, как оказалось, может существенно уменьшить ее энергоэффективность, поэтому была рассмотрена стена с шахматным расположением бетона и утеплителя. Было сделано предположение, что благодаря такому расположению путь теплового потока в перегородке должен увеличиться и общая теплопроводность снизится.

В данной задаче рассмотрены два варианта стены: с блоками из опилкобетона и блоками из гиперпрессованного кирпича. Материал утеплителя – экструдированный пенополистирол. Размеры стенок опалубки 50 мм. Размеры бетонного ядра: 150×175 мм. Размеры утеплителя: 100×175 мм.

На одной границе задана конвекция с температурой +20 °С и коэффициентом теплоотдачи 10 Вт/(м<sup>2</sup>·К), на другой границе также задана конвекция с коэффициентом теплоотдачи 10 Вт/(м<sup>2</sup>·К), но с температурой –30 °С. В результате расчета получено температурное поле. Для стенки с опилкобетоном оно представлено на рис. 6.

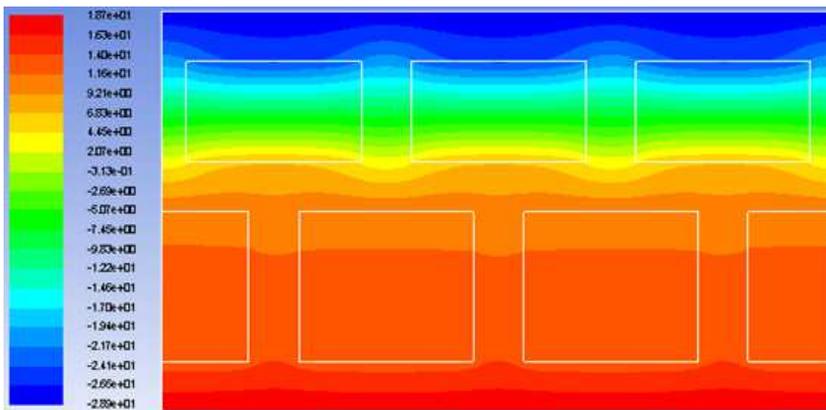


Рис. 6. Температурное поле в стене с материалом опалубки из опилкобетона

Температурное поле для стенки с опалубкой из гиперпрессованного кирпича представлено на рис. 7.

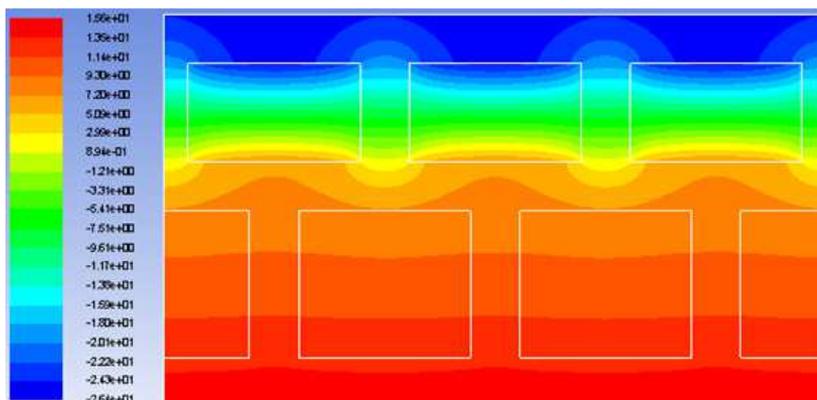


Рис. 7. Распределение температуры в стене из гиперпрессованного кирпича

По формуле (1) была найдена плотность теплового потока. Результаты представлены в табл. 5.

Таблица 5

Плотность теплового потока

Расположение	Плотность теплового потока, Вт/м <sup>2</sup>	
	Гиперпрессованный кирпич	Опилкобетон
Обычное	44,2	12,6
Шахматное	44,1	12,7

В результате исследования оказалось, что шахматное расположение бетона и утеплителя не увеличивает энергоэффективность конструкции.

**Выводы.** В результате работы проведено сравнение материалов стены. Выявлено, как различные материалы влияют на теплоэффективность. Также сделаны выводы о том, что перегородки в конструкции стены могут существенно увеличить теплопроводность. При исследовании варианта с шахматным расположением бетона и утеплителя оказалось, что такое расположение не улучшает энергоэффективность.

**Библиографический список**

1. ГОСТ Р 52085-2003. Опалубка. Общие технические условия // Доступ из справ.-правовой системы КонсультантПлюс.
2. ГОСТ Р 52086-2003. Опалубка. Термины и определения // Доступ из справ.-правовой системы КонсультантПлюс.

3. Басов К.А. ANSYS в примерах и задачах. – М.: Компьютер-Пресс, 2002. – 224 с.
4. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 542 с.
5. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. – М.: Мир, 1979. – 392 с.
6. ТУ 5741-021-00284753-99. Материалы строительные гиперпрессованные // Доступ из справ.-правовой системы КонсультантПлюс.
7. ГОСТ 530-2007. Кирпич и камень керамические. Общие технические условия // Доступ из справ.-правовой системы КонсультантПлюс.
8. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. Строительное материаловедение. – М.: Инфра-Инженерия, 2013. – 832 с.
9. Черняев В.В., Щербинин А.Г. Теплопередача. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. – 138 с.
10. ГОСТ 319113-2011. Материалы и изделия теплоизоляционные. Термины и определения // Доступ из справ.-правовой системы КонсультантПлюс.

### **References**

1. GOST R 52085-2003. Opalubka. Obshchie tekhnicheskie usloviia [GOST R 52085-2003. Decking. General specifications]. Dostup iz spravochno-pravovoi sistemy Konsul'tantPlius.
2. GOST R 52086-2003. Opalubka. Terminy i opredeleniia [GOST R 52086-2003. Decking. Terms and Definitions]. Dostup iz spravochno-pravovoi sistemy Konsul'tantPlius.
3. Basov K.A. ANSYS v primerakh i zadachakh [ANSYS in examples and tasks]. Moscow: Komp'iuterPress, 2002. 224 p.
4. Zenkevich O. Metod konechnykh elementov v tekhnike [Finite element method in engineering]. Moscow: Mir, 1975. 542 p.
5. Segerlind L. Primenenie metoda konechnykh elementov [Application of the finite element method]. Moscow: Mir, 1979. 392 p.
6. TU 5741-021-00284753-99. Materialy stroitel'nye giperpressovannye [TU 5741-021-00284753-99 Building materials hyperpressed]. Dostup iz spravochno-pravovoi sistemy Konsul'tantPlius.

7. ГОСТ 530-2007. Кирпич и камень керамические. Общие технические условия [GOST 530-2007. Brick and stone are ceramic. General specifications]. Dostup iz spravочно-pravovoi sistemy Konsul'tantPlius.

8. Dvorkin L.I., Dvorkin O.L. Stroitel'noe materialovedenie [Building Material Science]. Moscow: Infra-Inzheneriia, 2013. 832 p.

9. Cherniaev V.V., Shcherbinin A.G. Teploperedacha [Heat transfer]. Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2014. 138 p.

10. ГОСТ 319113-2011. Материалы и изделия теплоизоляционные. Термины и определения [GOST 319113-2011. Heat-insulating materials and products. Terms and Definitions]. Dostup iz spravочно-pravovoi sistemy Konsul'tantPlius.

### **Сведения об авторах**

**Бурдышев Иван Васильевич** (Пермь, Россия) – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: iburdyshev@mail.ru).

**Казаков Алексей Владимирович** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструирование и технологии в электротехнике» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: ktei@pstu.ru).

### **About the authors**

**Burdyshev Ivan Vasilievich** (Perm, Russian Federation) is a Student Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: iburdyshev@mail.ru).

**Kazakov Alexey Vladimirovich** (Perm, Russian Federation) is a Ph.D. in Technical Sciences, Associate professor Design and technology in electrical engineering Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: ktei@pstu.ru).

Получено 09.10.2017