

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 666.041.55

*КУДЯКОВ АЛЕКСАНДР ИВАНОВИЧ, докт. техн. наук, профессор,  
kudyakov@tsuab.ru  
Томский государственный архитектурно-строительный университет,  
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2  
АПКАРЬЯН АФАНАСИЙ СААКОВИЧ, канд. техн. наук,  
asakte@ispms.tsc.ru  
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,  
Томский университет систем управления и радиоэлектроники,  
634021 г. Томск, пр. Академический 8/2*

### **ТЕХНОЛОГИЯ ГРАНУЛИРОВАННОГО СТЕКЛОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЧЕРДАЧНОГО ПЕРЕКРЫТИЯ**

На основе стеклобоя, глины и органических добавок разработан гранулированный теплоизоляционный стеклокристаллический материал, а также технология его изготовления. Исследован процесс вспучивания стекломассы и установлены закономерности влияния состава шихты и температуры обжига на свойства гранул. Технические характеристики разработанного гранулированного теплоизоляционного материала: насыпная плотность 260–280 кг/м<sup>3</sup>, прочность гранул 1,7–1,8 МПа, коэффициент теплопроводности 0,075 Вт/(м·°С) и водопоглощение 2,6 % по массе. Приведены сравнительные данные по эффективности использования разработанного стеклокристаллического материала для теплоизоляции чердачных перекрытий зданий.

**Ключевые слова:** стеклобой; глина; органические добавки; шихта; обжиг; стеклокристаллический материал; гранулы; поры; средняя и насыпная плотность; прочность; водопоглощение; теплопроводность; расчет эффективности теплоизоляции.

*ALEKSANDR I. KUDYAKOV, DSc, Professor,  
kudyakov@tsuab.ru  
Tomsk State University of Architecture and Building,  
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia  
AFANASII S. APKAR'YAN, PhD,  
asakte@ispms.tsc.ru  
Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS,*

8/2, Akademicheskii Ave., 634021, Tomsk, Russia

## GLASS-CERAMIC GRANULATED TECHNOLOGY FOR EXTERIOR WALL HEAT INSULATION

The paper presents the development and technology of glass-ceramic granulated material based on broken glass, clay and organic additives. The process of swelling the glass mass is studied, and the mixture composition and burning temperature influence on grain properties are determined in this paper. Such specifications as pour density, grain hardness, thermal conductivity, and water absorption by mass are determined for the suggested granulated material. The data comparison is given for the efficient use of the suggested glass-ceramic material for heat insulation of attic floors.

**Keywords:** broken glass; clay; organic additives; mixture; baking; glass-ceramic material; grains; pores; pour density; hardness; water absorption; thermal conductivity; thermal insulation efficiency.

Одной из первостепенных задач развития экономики России является рациональное использование топливно-энергетических ресурсов. Приоритетная роль в решении этой задачи отводится энергосбережению в строительстве. Тенденция к повышению энергоэффективности проектируемых архитектурно-строительных систем путем увеличения теплозащиты ограждающих конструкций зданий способствует не только снижению расхода тепловой энергии, но и появлению новых видов теплоизоляционных материалов с малой теплопроводностью, а также инновационных технологий их изготовления с использованием отходов промышленной переработки природного сырья [1, 2].

При проектировании зданий необходимо большое внимание уделять качеству используемых строительных материалов для ограждающих конструкций, а именно уменьшению их средней плотности и теплопроводности при обеспечении требуемой прочности и высокой долговечности. В настоящее время для теплоизоляции чердачных перекрытий используют керамзитовый гравий, маты на основе минеральной ваты, базальтовых волокон (Теплорок, Rockpipe, Rockwool, Парос, Nobasil), штапельного стекловолокна (URSA, ISOVER, Тисма, KNAUF и т. д.), каучука (K-Flex, Armaflex) [3, 4].

Целью работы является разработка технологии стеклокристаллических теплоизоляционных гранул из стекольных отходов, глинистого сырья и органических добавок для теплозащиты чердачных перекрытий зданий.

Объект исследований – гранулированный стеклокристаллический материал.

Предмет исследований – процессы изготовления, свойства гранул теплоизоляционного стеклокристаллического материала и эффективность их использования при теплозащите чердачных перекрытий зданий.

Для достижения цели в работе поставлены следующие задачи:

- разработать составы шихт для получения гранулированного стеклокристаллического материала;
- исследовать процессы порообразования и формирования структуры стеклокристаллических гранул;
- провести теплотехнические расчеты и проанализировать эффективность многослойных теплозащитных систем чердачных перекрытий на основе теплоизоляционного гранулированного стеклокристаллического материала.

При проведении исследований теплоизоляционного гранулированного стеклокристаллического материала использовались исходные материалы: стеклянные производственные отходы, глина, кокс и древесные опилки.

По результатам предварительных исследований для изготовления гранул поризованного стеклокристаллического материала необходимо использовать стеклянные производственные отходы, имеющие химический состав, % по массе:  $\text{SiO}_2$  – 60–72,5,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 0–2,5,  $\text{CaO}$  – 4–6,0,  $\text{MgO}$  – 1,5–2,5,  $\text{Na}_2\text{O}$  – 12,5–15,0,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 1,2–1,57 [1]. Этому составу удовлетворяют оконные, бутылочные и электроколбочные стекла (табл. 1), которые использовались в работе.

Таблица 1

## Химический состав используемого боя стекла

Стекло	Химический состав										
	$\text{SiO}_2$	$\text{B}_2\text{O}_3$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{MgO}$	$\text{CaO}$	$\text{BaO}$	$\text{PbO}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{SO}_3$
Оконное	71,8	–	2	4,1	6,7	–	–	14,8	–	0,1	0,5
Тарное	71,5	–	3,3	3,2	5,2	–	–	16,0	–	0,6	0,2
Посудное	74,0	–	0,5	–	7,45	–	–	16,0	2	0,05	–
Электроколбочное	71,9	–	–	3,5	5,5	2,0	–	16,1	1,0	–	–

Глина вводилась в шихту для увеличения механической прочности межпоровых перегородок и поверхности гранул, а также уменьшения их водопоглощения. При проведении исследований использовались глинистые породы Томской области. В данной статье приведены результаты исследований гранул с использованием глины Кандинского месторождения. Глина классифицируется как суглинок пылеватый с преобладающим содержанием в нем окислов, % по массе:  $\text{SiO}_2$  – 70,73;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 17,12 и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 5,68. Хорошая вспучиваемость глины обеспечивается наличием минералов гидрослюда, монтмориллонита, соединений железа и полевого шпата. Кроме того, в состав глины входят кварц, полевые шпаты, карбонаты и органические примеси.

При обосновании выбора газообразователя принималось во внимание совпадение температурных интервалов появления расплава требуемой вязкости и образования наибольшего парциального давления газообразных продуктов [5]. В качестве высокотемпературного газообразователя (790–830 °С) использовался кокс.

Древесные опилки вводились для снижения вязкости расплава и обеспечения совместно с коксом устойчивого газообразования. Для получения теплоизоляционных гранул предпочтительно использование хвойных пород.

Для изготовления гранул установлен следующий интервальный состав шихты, в % по массе: отходы стекла – 67–84; глина – 8–25; кокс – 5 и древесные опилки – 3. Последовательность технологических процессов изготовле-

ния гранул: подготовка сырьевых компонентов и шихты, формование гранул, сушка и обжиг.

Отходы стекла измельчались в дробилке до зерен размером 1,5–3,0 мм, а затем в шаровой мельнице KM1 (VEB Leuchtenbau) совместно с древесными опилками до удельной поверхности частиц 300–350 м<sup>2</sup>/кг. В этой же мельнице осуществлялось измельчение раздельно кокса и глины. Полученные порошки стекла и древесных опилок, глины и кокса дозировались и загружались в стержневую вибрационную мельницу 75Т-ДрМ, где осуществлялось перемешивание (гомогенизация) шихты при дополнительном измельчении (механоактивации) компонентов до удельной поверхности 400 м<sup>2</sup>/кг. Полученная шихта затворялась водой (10–15 % от массы шихты) для достижения требуемой пластичности, а затем на грануляторе из нее формовались гранулы размером от 3 до 8 мм.

Обжиг изделий проводился во вращающейся печи при температуре 830–850 °С и интервале вспучивания 4–6 мин.

Порообразование и устойчивость пористой структуры зависят от поверхностной энергии на границе раздела фаз «газ – расплав». На рис. 1 приведены результаты исследований влияния содержания глины на плотность гранул. При содержании глины в шихте от 8 до 25 % создаются благоприятные условия для образования пор и получения гранул с плотностью от 200 до 300 кг/м<sup>3</sup>.

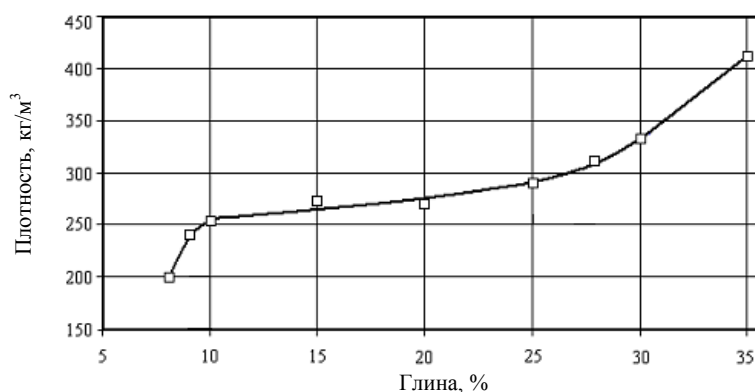


Рис. 1. Влияние содержания глины в шихте на плотность гранул

При увеличении содержания глины в шихте более 25 % поры объединяются с выделением газа в атмосферу – пена осаждается. Было предложено в качестве органической добавки вводить дополнительно в шихту древесные хвойные опилки. Экспериментально установлено, что при введении в шихту древесных опилок до 3 % и температуре обжига 830–850 °С увеличивается количество газов в расплаве и их парциальное давление. Рациональный состав шихты подобран таким образом, чтобы парциальное давление газов было меньше сил поверхностного натяжения расплава [5, 6]. В результате в гранулах образуется до 92 % закрытых пор размером 0,2–0,4 мм, у которых толщина разделительных стенок между ячейками находится в пределах от 0,07–0,1 мкм до 12 мкм (рис. 2).

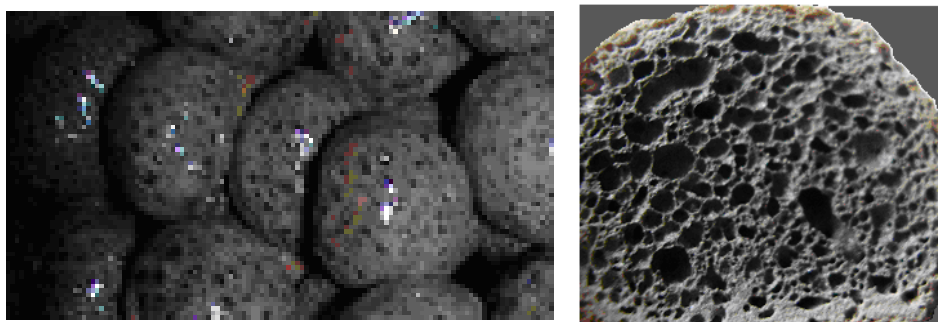


Рис. 2. Гранулы пеностеклокерамики

Характерным при обжиге гранул является термический удар в зоне высоких температур (830–850 °С) в восстановительной среде с содержанием СО 3,0 %. Наибольшее значение механической прочности гранул достигается при выдерживании в зоне высоких температур в течение 5–6 мин. Разработанный температурный режим процесса «вспенивание – порообразование – отжиг» обеспечивает формирование максимального количества пор требуемого размера и предотвращает процесс коалесценции пузырьков. Для снятия температурных напряжений необходим отжиг готовых гранул. При реализации разработанного режима обжига получен гранулированный теплоизоляционный стеклокристаллический материал с насыпной плотностью 260–280 кг/м<sup>3</sup>, прочностью гранул 1,7–1,8 МПа, коэффициентом теплопроводности 0,075 Вт/(м·°С) и водопоглощением 2,6 % по массе. Подготовлены практические рекомендации по реализации разработанной технологии в реальном секторе строительства. Разработаны технические условия на материал, подготовлен технологический регламент и получен патент РФ № 2374191.

С целью определения эффективности использования разработанного теплоизоляционного материала был проведен расчёт сопротивления теплопередачи чердачного перекрытия с многослойным покрытием из гранул теплоизоляционного стеклокристаллического материала и керамзитового гравия (рис. 3). Исходные данные для расчета приведены в табл. 2.

Таблица 2

## Исходные данные для расчета

№ п/п	Наименование параметра	Значение
1	Температура внутреннего воздуха здания, °С	20
2	Температура воздуха наиболее холодной пятидневки, °С, обеспеченностью 0,92	–40
3	Средняя температура воздуха отопительного периода, °С	–8,8
4	Продолжительность отопительного периода, сут	234
5	Район	г. Томск

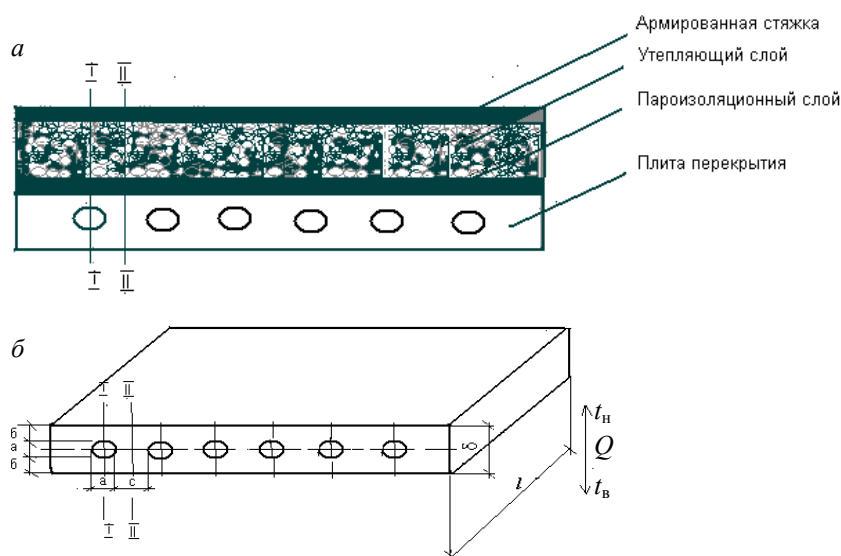


Рис. 3. Чердачное перекрытие с теплоизоляционным покрытием:

*a* – общий вид чердачного перекрытия с гранулированным теплоизоляционным материалом; *б* – расчетная схема железобетонной плиты с теплоизоляционным покрытием для определения термического сопротивления

Теплофизические характеристики материалов чердачного перекрытия приведены в табл. 3.

Таблица 3

**Теплофизические и геометрические характеристики материалов чердачного перекрытия**

Наименование материала	Толщина конструктивного слоя, $\delta$ , м	Расчетные коэффициенты теплопроводности материалов, $\lambda$ , Вт/м·°С
1. Раствор цементно-песчаный (ГОСТ 2813–89)	0,035	0,93
2. Керамзитовый гравий (ГОСТ 9757–90)	–	0,16
3. Стеклокристаллический гранулированный материал	–	0,075
4. Рубероид (ГОСТ 10923–93)	0,003	0,17
5. Железобетонная плита (ГОСТ 9561–91)	0,2 ( $d = 0,14$ )	2,04

Сопротивление теплопередачи чердачного перекрытия  $R_0$  определяется исходя из санитарно-гигиенических и комфортных условий ( $R_0^{мп1}$ ), а также условий энергосбережения (ГОСТ 30494–96, СНиП 23-02–2003, СНиП 23-01–99) по величине градусо-суток отопительного периода ( $R_0^{мп2}$ ) и равно соответственно 1,742 и 4,902 м<sup>2</sup>·°С/Вт.

Сопротивление теплопередачи ( $R_0 \cdot \text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ ) определяется по формуле

$$R_0 = R_{\text{вн.п}} + R_k + R_{\text{пр}} + R_{\text{н.п}},$$

где  $R_{\text{вн.п}} = 1/\alpha_{\text{вн.п}}$ ,  $\alpha_{\text{вн.п}} = 8,7$  – коэффициент теплопередачи внутренней поверхности ограждающих конструкций,  $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{°C}$  [1];  $R_{\text{н.п}} = 1/\alpha_{\text{н.п}}$ ,  $\alpha_{\text{н.п}} = 12$  – коэффициент теплопередачи наружной поверхности ограждающих конструкций для условий холодного периода,  $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{°C}$  [2];  $R_{\text{пр}}$  – приведенное термическое сопротивление пустотной железобетонной плиты по сечению I-I и II-II,  $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ .

$$R_{\text{пр}} = \frac{F_I + F_{II}}{\frac{F_I}{R_I} + \frac{F_{II}}{R_{II}}}, \quad R_I = \frac{b}{\lambda_{\text{ж.в}}} + R_{\text{вн}} + \frac{b}{\lambda_{\text{ж.в}}}, \quad R_I = \frac{0,03}{2,04} + 0,15 + \frac{0,03}{2,04} = 0,179,$$

где  $F_I, F_{II}$  – площади отдельных участков конструкции,  $\text{м}^2$ ;  $F_I = a \cdot n$ ;  $F_{II} = c \cdot m$ ;  $l$  – длина участка железобетонной плиты,  $l = 1,0$  м;  $a = 0,14$ ;  $c = a/2 = 0,07$ ;  $n$  – количество пустот;  $m$  – количество железобетонных участков между пустотами;  $R_I$  – термическое сопротивление неоднородного участка по сечению I-I,  $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ .

Для сечения II-II термическое сопротивление  $R_{II}$ ,  $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ , определяется по формуле

$$R_{II} = \frac{b}{\lambda_{\text{ж.в}}}, \quad R_{II} = \frac{0,2}{2,04} = 0,098, \quad \text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}, \quad F_{II} = 0,744 \text{ м}^2,$$

$$R_{\text{пр}} = 0,135 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}, \quad F_{II} = 0,49 \text{ м}^2,$$

где  $R_k$  – термическое сопротивление ограждающих конструкций,  $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ , с последовательно расположенными однородными слоями следует определять как сумму термических сопротивлений отдельных слоев:

$$R_k = R_1 + R_2 + \dots + R_n,$$

где  $R = \frac{\delta}{\lambda}$ ,  $\delta$  – толщина слоя, м;  $\lambda$  – расчетный коэффициент теплопроводности материала слоя,  $\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{°C}$ , принимаемый согласно 5.3 в работе [6].

Сопротивление теплопередачи определяется по формуле

$$R_0 = R_{\text{вн.п}} + R_k + R_{\text{пр}} + R_{\text{н.п}}.$$

$4,902 = 1/8,7 + 0,035/0,93 + \delta_2/0,16 + 0,003/0,17 + 0,1345 + 1/12 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ , откуда толщина теплоизоляционного слоя с использованием гранулированного теплоизоляционного материала равна

$$\delta_2^{\text{пск}} = (4,902 - 1/8,7 - 0,035/0,93 - 0,003/0,17 - 0,1345 - 1/12) \cdot 0,075 = 0,34 \text{ м},$$

а толщина теплоизоляционного слоя  $\delta_2$  с использованием керамзитового гравия составила

$$\delta_2^{\text{к}} = (4,902 - 1/8,7 - 0,035/0,93 - 0,003/0,17 - 0,1022 - 1/12) \cdot 0,16 = 0,72 \text{ м}.$$

Таким образом, для обеспечения требуемого термического сопротивления теплоизоляционной системы чердачного перекрытия из разработанного гранулированного теплоизоляционного материала толщина теплозащитного слоя покрытия должна быть равна 0,34 м, а покрытия с керамзитовым гравием – 0,72 м. При применении стеклокристаллического материала толщина

теплоизоляционного слоя уменьшается в 2,1 раза по сравнению с теплоизоляцией керамзитовым гравием.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Апкарьян, А.С.* Теплоизоляционные материалы. Пеностеклокерамика. Оптимизация теплофизических процессов: монография / А.С. Апкарьян, А.И. Кудяков. – Томск : Изд-во ТУСУР. – 2013. – С. 216.
2. *Blazy, C.* Reference book of the designer / С. Blazy // Building physics. – М., 2005. – 536 p.
3. *Кудяков, А.И.* Гранулированный теплоизоляционный материал / А.И. Кудяков, А.С. Апкарьян // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2013. – № 4. – С. 210–217.
4. *Гимик, В.В.* Строительные материалы из отходов промышленных производств / В.В. Гимик, В.И. Наумов, В.П. Сучков // Тр. научн.-техн. конф. «Строительный комплекс-98», ННГАСУ, 1999. – Н. Новгород, 1999.
5. *Принципы создания композиционных материалов / А.А. Берлин, С.А. Вольфсон, В.Г. Ошмян, Н.С. Ениколопян.* – М. : Химия, 1990. – 238 с.
6. *Emri, I.* Measuring system for bulk characterization of polymers / I. Emri, T. Prodan // Experimental Mechanics. – 2006. – V. 46. – № 4. – P. 429–439.

## REFERENCES

1. *Апкарьян А.С., Кудяков А.И.* Теплоизоляционные материалы. Пеностеклокерамика. Оптимизация теплофизических процессов: монография [Heat insulating materials. Foam glass-ceramics. Thermophysical process optimization. Monograph]. Tomsk : Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics Publ., 2013. P. 216. (rus)
2. *Blazy C.* Reference book of the designer. Building physics. Moscow, 2005. 536 p. (rus)
3. *Kudyakov A.I., Apyar'yan A.S.* Granulirovannyi teploizolyatsionnyi material [Heat-Insulating Granulated Material]. *Vestnik TSUAB.* 2013. No. 4. Pp. 210–217. (rus)
4. *Gimik V.V., Naumov V.I., Suchkov V.P.* Stroitel'nye materialy iz otkhodov promyshlennykh proizvodstv [Building materials based on industrial waste]. *Proc. Sci. Conf. 'Stroitel'nyi kompleks-98'*. NNGASU Publ., 1999. N. Novgorod, 1999. (rus)
5. *Berlin A.A., Vol'fson S.A., Oshmyan V.G., Enikolopyan N.S.* Printsipy sozdaniya kompozitsionnykh materialov [Composite technology]. Moscow : Khimiya Publ., 1990. 238 p. (rus)
6. *Emri I., Prodan T.* Measuring system for bulk characterization of polymers. *Experimental Mechanics.* 2006. V. 46. No. 4. Pp. 429–439.