

УДК 691.8

Габидуллин М.Г. – доктор технических наук, профессор

E-mail: gabmah@mail.ru

Мавлюбердинов А.Р. – кандидат технических наук, доцент**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

Габидуллина А.Н. – старший научный сотрудник**Институт механики и машиностроения Казанского научного центра РАН**

Адрес организации: 421101, Россия, г. Казань, ул. Ямашева, д. 82

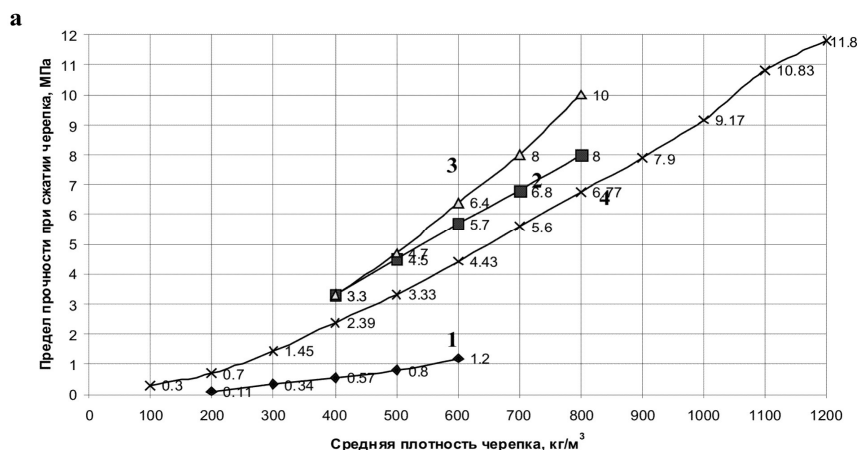
Разработка требований к основным свойствам пенокерамики**Аннотация**

Впервые для учета особенностей технологии производства пенокерамики и их взаимосвязи с разработанными базовыми нормативными значениями основных свойств пенокерамики введен «коэффициент технологичности» N , что позволило на основании данных литературного обзора для конструкционных, конструкционно-теплоизоляционных и теплоизоляционных пенокерамических материалов расчетно-графическим методом установить базовые показатели предела прочности при сжатии, представленные в виде номограмм и таблиц.

Ключевые слова: пенокерамика, зависимости, нормативные требования, «коэффициент технологичности», прочность, плотность.

Данные литературного обзора позволили установить для пенокерамики разбросанные по разным источникам отдельные численные показатели прочности при сжатии и изгибе, средней плотности, теплопроводности, водопоглощения, пористости и т.д. Так как в рассмотренных источниках имелась ограниченная информация по показателям свойств, последние подвергались математической интерполяции, экстраполяции и обобщению с целью построения кривых зависимостей изменения основных свойств пористых керамических материалов от изменения их средней плотности, как наиболее важного показателя, в интервале от 100 до 1200 кг/м³. В качестве основных свойств были определены предел прочности при сжатии, теплопроводность и водопоглощение, так как наряду со средней плотностью они также являются определяющими параметрами высокопористой керамики, и, кроме того, их значения в рассмотренных источниках приводятся наиболее часто и полно.

На основании данных работ [1, 2] были построены отдельные кривые (рис. 1 а) зависимостей изменения предела прочности при сжатии пенокерамики с увеличением средней плотности в интервале от 100 до 1200 кг/м³, охватывающие теплоизоляционную, конструкционно-теплоизоляционную и конструкционную пенокерамику. Кривая 1 (рис. 1) построена по численным значениям показателей прочности особо легкой пенокерамики пористостью 85-91,5 % и плотностью 190-460 кг/м³, полученной зарубежными учеными Junge K. и Rimpl E. [3] на основе обычных глин.



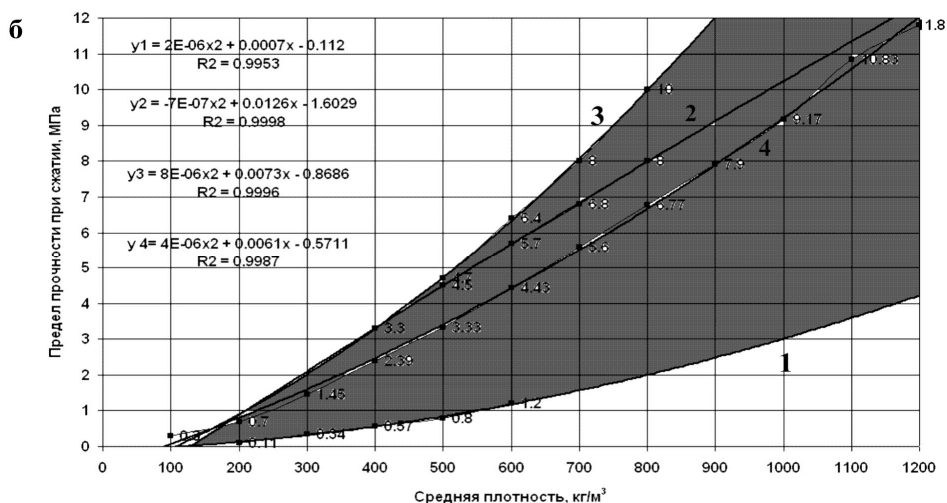


Рис. 1. Зависимости изменения предела прочности при сжатии пенокерамики с увеличением средней плотности по данным литературного обзора: а – по исходным данным, б – обобщенные после математической обработки; 1 – для [5], 2 – для [6], 3 – [6], 4 – кривая по среднестатистическим данным из [5, 6]

При этом особое внимание в технологиях уделялось выбору стабилизирующих пенообразующих добавок с одновременным снижением количества воды, времени сушки и усадки. Кривые 2 и 3, расположенные значительно выше кривой 1, построены по данным прочностных показателей конструкционно-теплоизоляционного пенокирпича плотностью 400-800 кг/м³, полученного Ахундовым А.А. [4] путем введения в шликер эффективных пенообразователей «Морпен» или «Неорог». При этом достигнута очень быстрая коагуляция пеномассы за счет введения оптимального количества (0,5 %) CaCl₂ и цемента (1 %). Высокие прочностные показатели получены за счет дополнительной потенциальной возможности глиняного сырья к коагуляции (коэффициент коагуляции равен 112), учета pH-среды и соответствия коэффициента коагуляции (КК) выбранным разжижителям шликеров, а также введения в шликерную массу эффективных отощителей. Кроме того, повышение прочности связано с использованием оригинальной технологии сушки путем «изменения направления испарения воды» за счет переворачивания изделия на 180 градусов в процессе сушки. Кривая 3 – результат лабораторных исследований, а кривая 2 построена по данным испытания опытно-промышленной партии пенокерамики, выпущенной на Обольском керамическом заводе. Кривая 4 получена на основе среднестатистических данных кривых 1, 2 и 3.

Видно, что кривая 1 «работает» в интервале от 190 до 600 кг/м³, а кривые 2 и 3 от 400 до 800 кг/м³, не охватывая области за указанными границами. Поэтому с помощью математического преобразования (экстраполяции) были рассчитаны дополнительные данные на весь интервал средней плотности от 100 до 1200 кг/м³, присущий для теплоизоляционной, конструкционно-теплоизоляционной и конструкционной пенокерамики, по которым были построены новые кривые и получены к ним уравнения (рис. 1 б).

Из рис. 1 б видно, что область распределения (закрашенная зона) показателей предела прочности при сжатии пенокерамических материалов, полученных различными способами, имеет широкие границы (между кривыми 1 и 3), что связано с большим разбросом данных. Из этого следует, что имеется возможность регулирования прочностных показателей пенокерамики в широких пределах путем изменения свойств сырья, добавок, составов шихт и шликера, режимов технологии. Если судить о прочности пенокерамики по усредненным данным (кривая 4, рис. 1 а), то можно установить, что прочность при сжатии теплоизоляционной пенокерамики (ТИПК) плотностью до 400 кг/м³ составляет менее 2,39 МПа, прочность конструкционно-теплоизоляционной (КТИПК) находится в пределах от 2,39 МПа до 6,77, а для конструкционной (КПК) плотностью от 800 до 1200 кг/м³ прочность равна 6,77-12 МПа.

Для установления ориентировочных нормативных требований к пределу прочности при сжатии пенокерамических материалов, на основании усредненных данных по работам [139, 140], установлена обобщенная корреляционная зависимость между прочностью и средней плотностью (рис. 1 б, кривая 4), выражаемая формулой $Y=4E-06x^2+0.0061x-0.5711$. Характер этой связи показывает возрастание прочности в большей степени с увеличением средней плотности. Но использование данной зависимости для практического применения не совсем корректно, так как имеет большую ошибку.

Поэтому, с целью повышения вероятности получения достоверных данных по прочности пенокерамики, учитывающих особенности принятой технологии, введено новое понятие – «коэффициент технологичности» производства пенокерамики, являющийся некоторой константой для определенного способа производства и связывающий между собой зависимости изменения свойств от изменения средней плотности, полученные при различных технологиях.

Расчет «коэффициента технологичности»

Характер кривых, представленных на рис. 1, показывает, что они подобны или изохромны, т.е. отличаются друг от друга по амплитуде. Это позволяет ввести в расчет новый параметр – «коэффициент технологичности» (комплексный коэффициент N), характеризующий способ изготовления пенокерамики. Для удобства расчетов и математических преобразований дополним кривые на рис. 1 новыми кривыми (пунктирные, рис. 2), разместив их подобно кривым 1, 2, 3 и 4, и введем для них новую нумерацию снизу вверх. Тогда кривые 1 и 4 сохранят свою нумерацию, а 2-я и 3-я располагаются через одинаковый интервал между кривыми 1 и 4, а 5-я кривая размещается между 4-й и 6-й. Шестая кривая – это перенумерованная 3-я из рис. 1. Таким образом, кривые 1, 4 и 6 построены на основании данных, взятых из литературного обзора, а точки на дополнительных кривых 2, 3 и 5 характеризуют результаты прочности пенокерамики, полученные по неизвестной технологии.

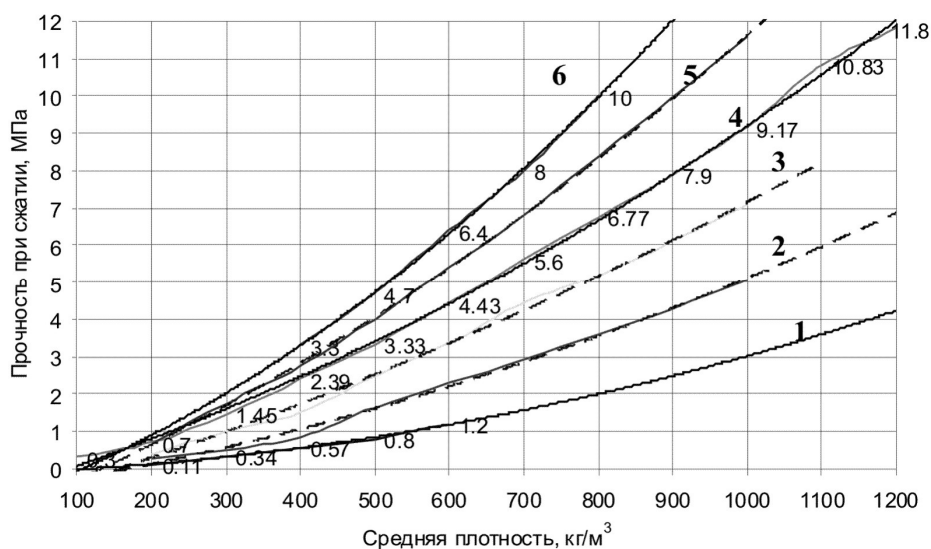


Рис. 2. Подобные кривые зависимостей изменения прочности при сжатии пенокерамики от увеличения средней плотности, полученные при различных технологиях производства, характеризуемых «коэффициентом технологичности» N :

- 1 – кривая для данных по [5] при N , равном 1; 2 – кривая при $N=2$; 3 – то же при $N=3$;
4 – кривая с усредненными данными при $N=4$; 5 – кривая при $N=5$; 6 – то же при $N=6$ по [6]

Для сведения к системе линейных задач кривые, представленные на рис. 2, можно описать уравнением вида:

$$Y_i = a_i x^2 + b_i x + c_i, \quad (1)$$

где $i = 1-6$.

По построенным зависимостям отношений прочности кривых 1, 4 и 6 к соответствующим изменениям средней плотности составляем матрицы коэффициентов для этих кривых.

Решаем эти матрицы в программе MathCad Professional, для чего вводим функцию уравнения регрессии:

$$A_1 = f(N) = K_0 + K_1N + K_2N^2. \tag{2}$$

Окончательный анализ полученных данных выражается формулой:

$$Y(x,N) := A_1 \text{reg}(N) \cdot x^2 + B_1 \text{reg}(N) \cdot x - C_1 \text{reg}(N). \tag{3}$$

В MathCad строим для них номограммы, представленные на рис. 3.

Пользуясь построенными номограммами, можно оперативно установить или спрогнозировать предел прочности пенокерамики, изготовленной по определенной технологической схеме. Для этого достаточно изготовить по данной технологии только один контрольный образец, определить его предел прочности при сжатии и среднюю плотность.

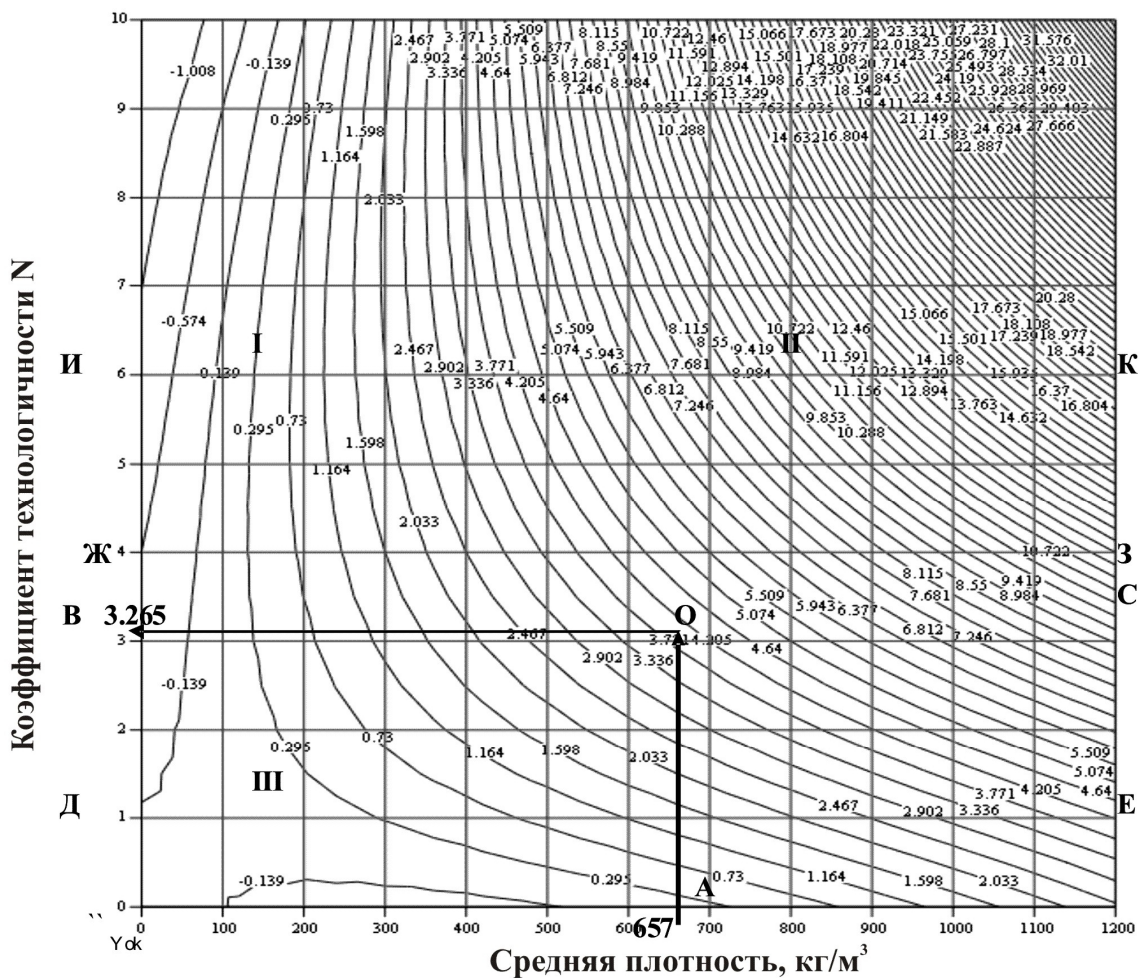


Рис. 3. Номограммы зависимостей изменения «коэффициента технологичности» N и предела прочности при сжатии пенокерамики при изменении средней плотности от 100 до 1200 кг/м³, установленных по данным литературного обзора

Возможность практического использования полученных номограмм, представленных на рис. 3, продемонстрируем примером. Пусть из некоторого состава шликера с использованием определенной технологии изготовлены изделия пенокерамики.

Для определения предела прочности образцов во всем интервале плотности (от 100 до 1200 кг/м³) изготавливаем из одного состава три контрольных образца, у которых определяем предел прочности при сжатии и среднюю плотность. Рассчитав средние

значения прочности и среднюю плотность (принимаяем $R_{cp}=4,205$ МПа, $\rho_{cp}=657$ кг/м³), на пересечении перпендикуляра из точки **A** (657 кг/м³), расположенной на оси абсцисс, к кривой прочности с $R=4,205$ МПа, находим точку **O**, от которой горизонтально до пересечения с осью абсцисс в точке **B** находим искомое значение «коэффициента технологичности» N , равное $3,265$. По номограмме на пересечении горизонтальной линии BC с кривыми прочности можно графически установить значение предела прочности при сжатии пенокерамики для любого заданного показателя плотности.

Из рис. 3 видно, что при изменении плотности от 200 до 1200 кг/м³ прочность пенокерамики, изготовленной по технологии с $N=3,265$, изменяется соответственно от $0,73$ до $9,853$ МПа. Ошибка предложенного расчетно-графического способа определения прочности не выше 5% .

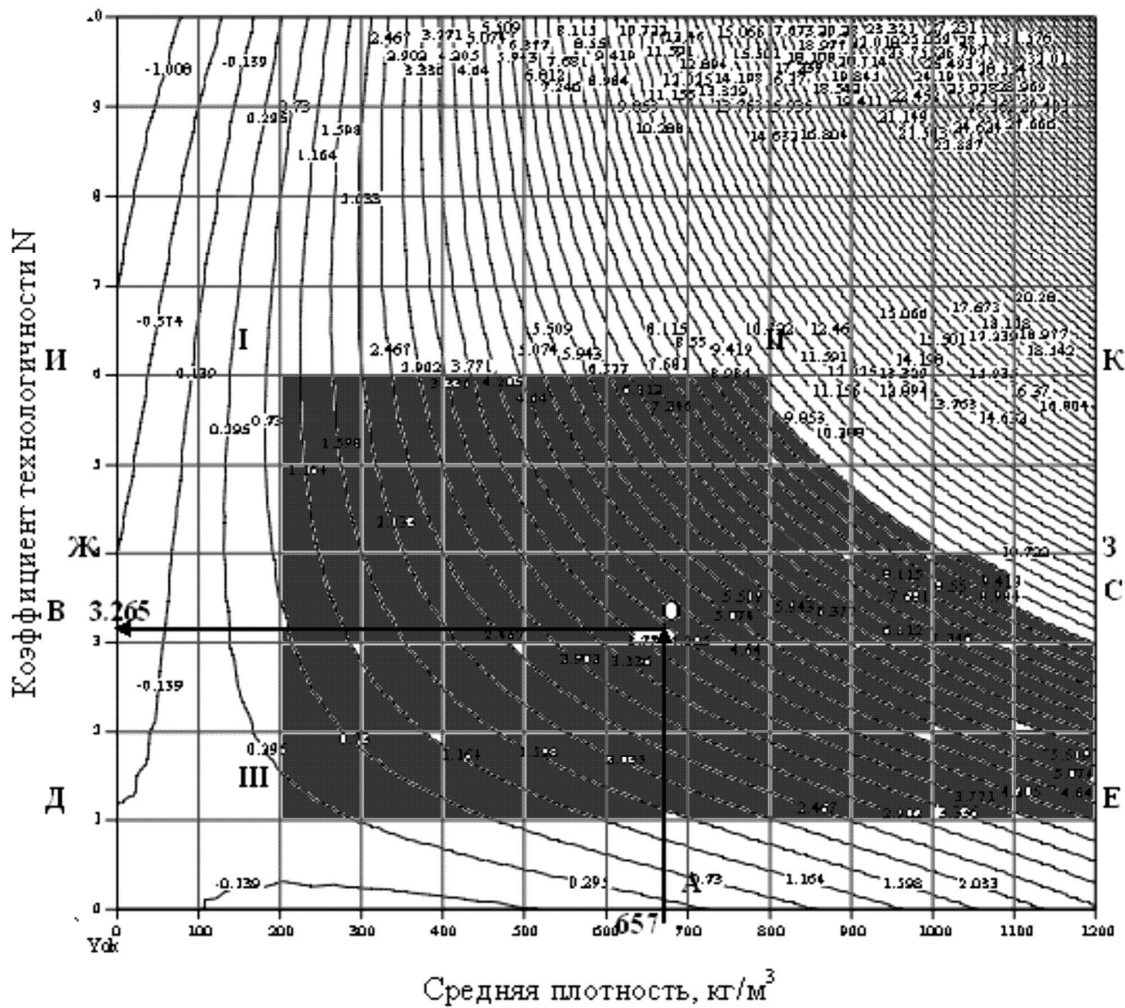


Рис. 4. Расположение на номограмме области «I-II-C-E-III-I» (закрашена), характеризующей изменение прочности при сжатии пенокерамики, полученной по технологиям с «коэффициентом технологичности» N от 1 до 6

Анализ расчетов показывает, что для кривых 1; 5 и 6, представленных на рис. 1 б, «коэффициенты технологичности» N принимаются равными соответственно $1, 5$ и 6 . Тогда по полученным номограммам (рис. 4) можно с допустимой вероятностью $0,95$ установить нормативные значения предела прочности при сжатии пенокерамики, полученной по разным технологиям, приведенным в работах [3, 4], для рассматриваемого интервала средней плотности от 100 до 1200 кг/м³ (таблица 1).

Таблица 1

Разработанные нормативные требования к пределу прочности при сжатии пенокерамики, полученной по технологиям, согласно работ [3, 4]

Средняя плотность, кг/м ³	Базовые нормативы предела прочности при сжатии, МПа, принимаемые по технологиям					
	[3] при N=1		[4] при N=5		[4] при N=6	
	min	max	min	max	Min	max
1	2	3	4	5	6	7
Теплоизоляционная пенокерамика (100-400 кг/м ³)						
100	0.15	0.16	-	-	-	-
200	0.21	0.24	0.90	0.99	0.90	0.99
300	0.28	0.31	1.72	1.91	1.93	2.13
400	0.49	0.54	2.96	3.28	3.17	3.51
Конструктивно-теплоизоляционная пенокерамика (500-800 кг/м ³)						
500	0.90	0.99	3.79	4.18	4.41	4.87
600	1.11	1.22	5.03	5.55	6.06	6.69
700	1.52	1.68	6.47	7.15	7.50	8.29
800	1.93	2.13	7.92	8.75	9.57	10.57
Конструкционная пенокерамика (900-1200 кг/м ³)						
900	2.34	2.59	9.57	10.57	11.42	12.62
1000	2.96	3.28	10.60	11.72	13.49	14.91
1100	3.38	3.73	12.66	14.00	15.14	16.73
1200	4.20	4.65	15.14	16.74	17.61	19.47

Аналогичным способом могут строиться номограммы водопоглощения и теплопроводности, которые в данной работе из-за недостаточности литературных данных не построены. По мере пополнения базы данных новыми экспериментальными данными, полученными разными авторами, их нормативные значения теплопроводности и водопоглощения будут уточняться и корректироваться с учетом «коэффициента технологичности».

Из представленных на рис. 5 зависимостей изменения теплопроводности и водопоглощения пенокерамики по данным [7, 8] с увеличением ее средней плотности видно, что в указанном интервале теплопроводность увеличивается по закону $Y = 0.0399 \cdot e^{0.0021x}$ от 0,049 до 0,296 Вт/(м·°С), а водопоглощение снижается с 52,1 до 28,4% ($Y = 3 \cdot 10^{-6} x^2 - 0.025x + 54.591$). По полученным зависимостям установлены ориентировочные нормативные требования к теплопроводности и водопоглощению для пенокерамики (табл. 2).

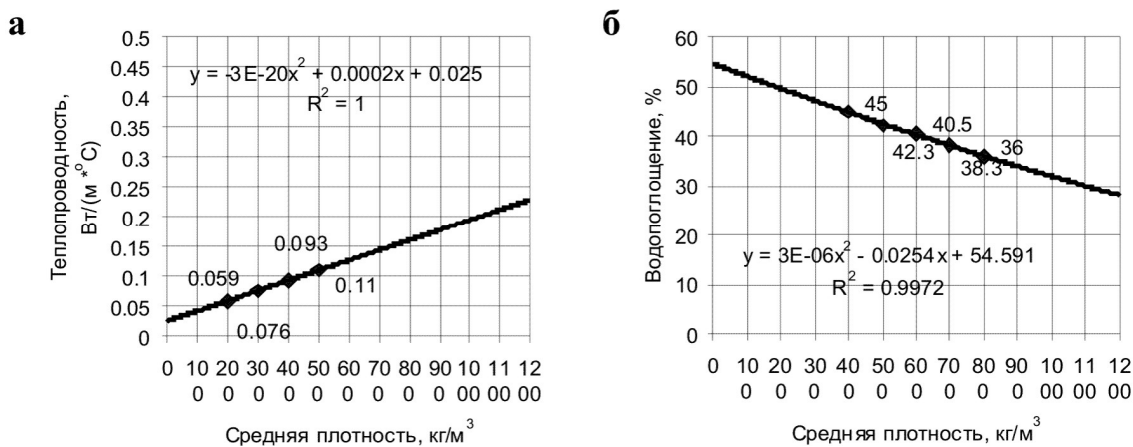


Рис. 5. Обобщенные зависимости изменения теплопроводности (а) и водопоглощения (б) пенокерамики с увеличением средней плотности по данным литературного обзора: а – по данным из [7], б – по данным из [8]

Таблица 2

**Разработанные нормативные и ориентировочные требования
к основным свойствам пенокерамики,
установленные по данным литературного обзора**

Средняя плотность, кг/м ³	Установленные требования к основным свойствам пенокерамики					
	Прочность при сжатии, МПа		Теплопроводность, Вт/(м·°С)		Водопоглощение, %	
Теплоизоляционная (100-400 кг/м ³)						
100	0.76	0.84	0.047	0.051	49.5	52.1
200	0.77	0.85	0.058	0.064	47.12	52.1
300	1.54	1.7	0.071	0.079	44.84	49.56
400	2.38	2.64	0.087	0.097	42.66	47.15
Конструкционно-теплоизоляционная (500-800 кг/м ³)						
500	3.31	3.65	0.108	0.12	40.47	44.73
600	4.3	4.76	0.134	0.148	38.38	42.42
700	5.38	5.94	0.165	0.183	36.39	40.22
800	6.53	7.21	0.203	0.225	34.39	38.01
Конструкционная (900-1200 кг/м ³)						
900	7.75	8.57	0.251	0.277	32.49	35.91
1000	9.05	10	0.310	0.342	30.59	33.81
1100					28.5	31.5
1200	11.88	13.14	0.471	0.521	26.98	29.82
Обобщенные уравнения	$y = 4 \cdot 10^{-6}x^2 + 0.0061x - 0.5711$ $R^2 = 0.9987$		$y = -3 \cdot 10^{-20}x^2 + 0.0002x + 0.025$ $R^2 = 1$		$y = 3 \cdot 10^{-6}x^2 - 0.0254x + 54.591$ $R^2 = 0.9972$	
Источники данных	[3, 4]		[3]		[4]	

Анализ численных значений свойств пенокерамики, полученных разными авторами по данным литературного обзора, позволил установить:

- свойства пенокерамики очень чувствительны к изменениям режимов технологии и могут изменяться в очень широких пределах для изделий с одинаковой средней плотностью, поэтому разработка единых нормативных показателей для пенокерамики, изготовленной по разным технологиям, является некорректной задачей;

- впервые для учета особенностей технологии производства пенокерамики и их взаимосвязи с разработанными базовыми нормативными значениями основных свойств пенокерамики введен «коэффициент технологичности» N;

- введение «коэффициента технологичности» позволило на основании данных литературного обзора для конструкционных, конструкционно-теплоизоляционных и теплоизоляционных пенокерамических материалов расчетно-графическим методом установить базовые показатели предела прочности при сжатии, представленные в виде номограмм и таблиц;

- по данным литературного обзора разработаны и представлены в табличной форме примерные ориентировочные данные теплопроводности и водопоглощения пенокерамики.

Тем не менее, с целью уточнения разработанных нормативов и их корректировки требуется их проверка дополнительными исследованиями.

Список литературы

1. Бабосова В.А. О выборе фторидов в качестве кристаллизации системы CaO-MgO-SiO₂-R₂O-Al₂O₃ // Сборник «Новые стекла и стекломатериалы». – Минск: Наука и техника, 1965.
2. Павлушкин Н.М. О влиянии соотношения Fe²⁺/Fe³⁺ в стеклах на их кристаллизацию // Производство и исследование стекла и силикатных материалов. – Ярославль, 1973. Вып. 3. – С.15-18.

3. Промышленное производство высокопористых строительных материалов // Technische Elerstellung von hochporösen Ziegelmaterialien / Junge-Karsten, Rimpel E. // Ziegelind Inst, 1996, № 49. – P. 195-197.
4. Ахундов А.А., Езерский В.А. Отчет о НИР по теме: «Разработать технологию и комплект оборудования для производства конструктивно-теплоизоляционных пенокерамических материалов плотностью 700-900 кг/м³». № гос.рег. 01.9.80 006687. Инв. № 029.90001740. – Красково, 1999. – 71 с.
5. Оганесян Р.Б., Большаков В.Н. Технологическая схема по производству бесцементных поризованных керамических изделий на основе легкоплавких глин: сб. научных трудов ЦНИИЭПсельстроя. – М., 1975.
6. Грошев И.А. Получение теплоизоляционной керамики из лессового сырья Казахстана: автореф. дис....канд. техн. наук, МУТИ. – М., 1984.
7. Заявка № 3193678 Япония МКИ С 04 В 38/00. Состав пористого керамического изделия // Хирота Тамоцу, Китадзе Наохару, Нисимуро Микио. Опубл. 23.08.91.
8. Книгина В.И. Лигнин в производстве стеновой керамики // Строительные материалы, 1984, № 10. – С. 13-15.

Gabidullin M.G. – doctor of technical sciences, professor

Mavlyuberdinov A.R. – candidate of technical sciences, associate professor

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Gabidullina A.N. – senior researcher

Institute of Mechanics and Engineering, Kazan Science Centre

The organization address: 421101, Russia, Kazan, Iamasheva st., 82

Development of requirements for basic properties of foamed ceramics

Resume

Nowadays, issues of resource and energy consumption in the production and use of construction ceramics is paid much attention. Therefore, in recent years the construction industry of Russia develops and increases the release of effective ceramic wall materials in the form of porous, hollow porous bricks, stones and blocks, with thermal conductivity down to 0,14-0,2 W/m·°C). Greater reduction in thermal conductivity (0,08-0,12) may be achieved by using ceramic foam wall blocks, which are not produced industrially in Russia yet. One reason is the lack of developed scientific and technological bases of their production, as well as the lack of standards, regulating main characteristics of ceramic foam materials.

This article attempts to develop the requirements for the values of compressive strength, water absorption and thermal conductivity of foamed ceramics, i.e. to solve the urgent problems of modern materials – to promote diversification of efficient building materials.

The dependence of ultimate compressive strength on average density was analyzed on the basis of a number of studies of native and foreign scientists, and was plotted for the range of density of 100 to 1200 kg/m³ using extrapolation, separately for heat-insulating, heat-insulating-and-construction and construction ceramic foam materials. That was necessary, because previously published data didn't cover all the required range of density values, for example, only 190 to 600 kg/m³, or only 400 to 800 kg/m³. Therefore, extra values were calculated using extrapolation to cover the entire range of the average density of 100 to 1200 kg/m³, typical for heat-insulating, heat-insulating-and-construction and construction ceramic foam materials. Subsequently, new curves, based on calculated data, were obtained with analytical description.

For the first time «manufacturability factor» N was introduced, in order to take into account the features of foamed ceramics production technology and their affect on the newly established standard values of foamed ceramics characteristics. That made it possible to determine basic values of the ultimate compressive strength, presented in the form of nomograms and tables, by calculations and graphical method on the basis of literature review of engineering and heat-insulating ceramic foam materials.

Keywords: foamed ceramics, correlations, standards, «manufacturability factor» strength, density.

References

1. Babosova V.A. About choice of fluorides as a crystallization of the CaO-MgO-SiO₂-R₂O-Al₂O₃ system // «New glass and glass materials» collection. – Minsk: Science and Technology, 1965.
2. Pavlushkin N.M. The effect of the Fe²⁺ to Fe³⁺ ratio in the glasses on their crystallization // Production and studies of glass and silicate materials. – Yaroslavl, 1973. Issue 3. – P. 15-18.
3. Industrial production of highly porous building materials // Technische Elerstellung von hochporosen Ziegelmaterialen / Junge-Karsten, Rimpel E. // Ziegelind Inst, 1996, № 49. – P. 195-197.
4. Akhundov A.A., Ezersky V.A. The report on research on the topic: «To develop a technology and equipment for the production of a heat-insulating ceramic foam construction-material of 700-900 kg/m³ density». Reg. number. 01.9.80 006687. Inv. № 029.90001740. – Kraskovo, 1999. – 71 p.
5. Oganesyanyan R.B., Bolshakov V.N. Technological scheme for production of cementless porous ceramic products based on fusible clays. Collection of scientific papers CNIIEPSelSroy. – M., 1975.
6. Groshev I.A. Production of heat-insulating ceramic materials from loess materials of Kazakhstan. PhD thesis, MUTI. – M., 1984.
7. Application number 3193678, Japan MKI C 04 B 38/00. The composition of a porous ceramic product // Hirota Tamotsu, Kitadze Naoharu, Mikio Nishimura. Published 23.08.91.
8. Knigina V.I. Lignin in the production of ceramic wall materials // Construction Materials, 1984, № 10. – P. 13-15.