

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ
ПОД НАГРУЗКОЙ ВЫСОКОПУСТОТНЫХ
КЕРАМИЧЕСКИХ СТЕНОВЫХ ИЗДЕЛИЙ И КЛАДОК НА ИХ ОСНОВЕ**

**COMPUTER MODELING OF WORK
UNDER THE LOAD OF HIGH-LOOSE
CERAMIC WALL ARTICLES AND CLASSICS BASED ON THEIR BASIS**

*А.И. БЕДОВ, А.М. ГАЙСИН, А.И. ГАБИТОВ
A.I. BEDOV, A.M. GAISIN, A.I. GABITOV*

(Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,
Уфимский государственный нефтяной технический университет)
(National Research University Moscow State University of Civil Engineering,
Ufa State Oil Technical University)
E-mail: gbk@mgsu.ru

Рассмотрена номенклатура высокопустотных стеновых керамических изделий, производимых в настоящее время в Республике Башкортостан. Осуществлены моделирование и расчет высокопустотных керамических камней в программном комплексе SCAD, получены геометрические параметры модели разрушения. Приведены результаты механических испытаний высокопустотных керамических изделий. Выполненное моделирование и расчеты в программном комплексе SCAD с получением геометрических параметров модели разрушения позволили оценить сходимость результатов расчета с реальными результатами испытаний.

The nomenclature of high-walled wall ceramic products, currently produced in the Republic of Bashkortostan, is considered. Modeling and calculation of high-purity ceramic stones in the SCAD software complex have been submitted, geometric parameters of the fracture model have been obtained. The results of mechanical tests of high-vacuum ceramic products are presented. The performed simulation and calculations in the SCAD software package with obtaining geometric parameters of the fracture model allowed estimating the convergence of calculation results with real test results.

Ключевые слова: высокопустотные керамические изделия, теплотехнический расчет, каменные конструкции зданий, энергоэффективность, модель, напряжения, деформации, испытания, метод конечных элементов.

Keywords: high-vacuum ceramic products, heat engineering calculation, stone constructions of buildings, energy efficiency, model, stresses, strains, tests, finite element method.

В современных условиях проблемы энерго- и ресурсосбережения приобретают все большую актуальность. В настоящее время существует несколько основных направлений повышения энергоэффективности существующих и строящихся зданий: применение теплоэффективных

ограждающих конструкций; применение современных систем вентиляции и кондиционирования; совершенствование объемно-планировочных решений; повышение эффективности систем отопления; санация жилого фонда. Все эти решения в достаточной степени известны специалистам и при

наличии необходимых стимулов могут быть оперативно внедрены в практику строительства. Вопрос снижения теплопотерь в жилых зданиях должен решаться всесторонне, а для достижения максимального эффекта перечисленные мероприятия должны применяться комплексно [1], [2]. Тем не менее, главным направлением энергосбережения в жилых зданиях является снижение потерь тепла через ограждающие конструкции. Сейчас для обеспечения требуемых показателей энергоэффективности внешние стены жилых зданий строят многослойными, содержащими несущий и теплоизоляционный слои [2], [3]. Однако эти конструктивные решения содержат множество разнородных элементов, что снижает их надежность с учетом вероятности отказов из-за воздействия большого количества факторов, оказывающих влияние на их эксплуатационную надежность и долговечность. В этом отношении наружные стены, выполненные из однородного конструкционно-теплоизоляционного материала, представляются более прогнозируемыми и надежными в эксплуатации [4]. Тем более, практика показывает, что, например, здания с ограждающими конструкциями из пустотно-поризованных камней по удельной теплозащитной характеристике незначительно уступают трехслойной стеновой конструкции с несущим слоем из полнотелого керамического кирпича и слоем эффективной теплоизоляции [5], [6].

В высотных каркасных зданиях, где пустотно-поризованные керамические камни выступают в роли ненесущих стен-заполнений, особых вопросов к работе материала под нагрузкой не возникает. Другое дело в бескаркасных зданиях, где кладка из высокопустотных керамических камней выполняет несущую функцию. В связи с тем, что пустоты в таких камнях являются концентраторами напряжений и уменьшают площадь рабочего сечения камня, возникает необходимость более детального изучения поведения под нагрузкой материала, которое позволит определить влияние размеров камней, конфигурации пустот, прочностных и деформационных характеристик материалов на напряженно-деформированное

состояние кладки в целом и последовательность разрушения под действием сжимающей нагрузки.

Еще в 1950-е годы Л.И.Онищик, стремясь объяснить упругие и механические свойства пустотелого кирпича, предложил рабочую модель кирпича пустотностью 25%. Сложность моделирования заключается в том, что каменная кладка является монолитным неоднородным упругопластическим материалом. Даже при равномерном распределении нагрузки по всему сечению сжатого элемента камень и раствор в кладке находятся в условиях сложного напряженного состояния. Они одновременно подвержены внецентренному сжатию, изгибу, растяжению, срезу и смятию [7], [8].

Целью проведенных исследований являлось моделирование и расчет высокопустотных керамических камней и кладок на их основе в программном комплексе SCAD, получение геометрических параметров модели разрушения и оценка сходимости результатов компьютерного расчета с результатами экспериментальных испытаний [9].

В качестве примера рассмотрен керамический рядовой камень Porikam формата 7НФ с размерами 250×250×219 мм с пустотностью 48% (рис.1).

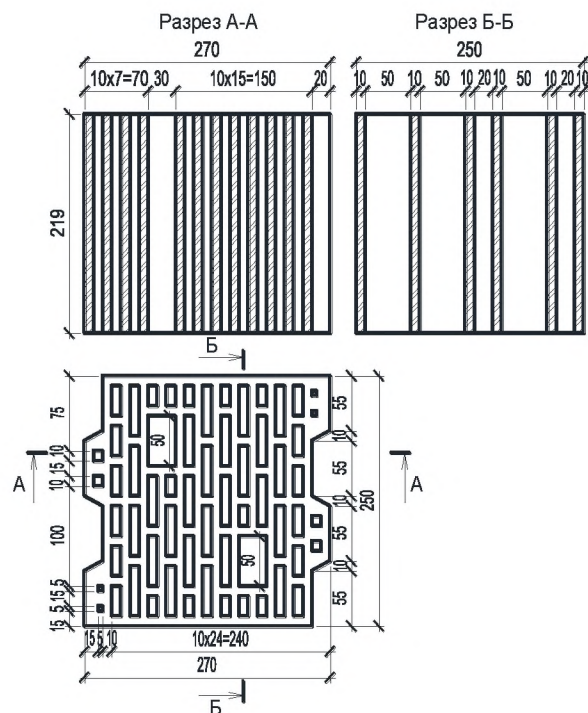
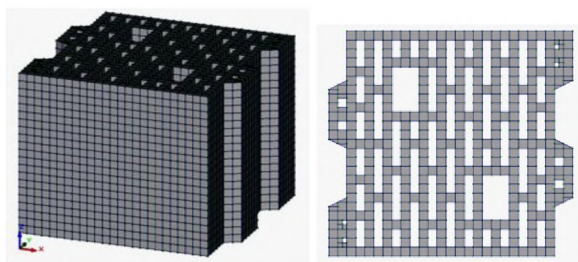


Рис. 1

В программном комплексе SCAD (версия 11.1) из шести- и восьмиузловых объемных элементов была создана модель камня Porikam формата 7НФ. Максимальный шаг сетки составил десять миллиметров, минимальный – пять миллиметров (рис. 2 – модель керамического рядового камня Porikam формата 7НФ в программном комплексе SCAD: а) общий вид, б) вид сверху).



а) б)
Рис. 2

Далее были установлены необходимые связи, заданы жесткостные характеристики материала камня, нагрузка на объемные элементы и произведен непосредственно расчет изделия на сжатие. В программном комплексе SCAD исследуемый материал описывается через плотность, модуль упругости и коэффициент Пуассона. В расчете жесткостные характеристики камней принимались по данным завода-производителя, плотность камня $\rho = 800 \text{ кг/м}^3$, коэффициент Пуассона согласно рекомендациям ряда авторов $\nu = 0,08 \dots 0,12$ [10].

Рассмотрев модель высокопустотного керамического камня 7НФ, можно сделать вывод, что прочностные характеристики материала в программном комплексе SCAD, задаваемые только одним параметром – модулем упругости, который, в свою очередь, подразумевает определенные значения предела прочности материала, не могут описать поведение под нагрузкой изделий достаточно корректно.

При нагружении камня в стенках между пустотами возникают концентрации горизонтальных растягивающих напряжений. В целом характер распределения напряжений и их интенсивность по высоте кирпича не соответствуют однородному элементу без пустот, в НДС которого отсутствуют растягивающие напряжения. Распределение сжимающих и растягивающих напряжений изменяется по мере продвижения к центру сечения [11], [12]. Первая трещина появилась в продольной наружной стенке при уровне нагрузки 0,6 от разрушающей N_{ult} . В диапазоне нагрузок от 0,6 до 0,8 N_{ult} продолжилось развитие трещин в наружных продольных стенках камня, появились трещины в поперечных стенках. При уровне нагрузки свыше 0,85 N_{ult} произошло разрушение наружных, а затем и внутренних стенок по периметру камня с сохранением основного ядра сечения.

По результатам испытаний установлена марка прочности камней 7НФ при сжатии, соответствующая М100. Средние результаты испытаний по сериям высокопустотных керамических камней на сжатие приведены в табл. 1. Как показал натурный эксперимент, при нагрузках, равных 0,5...0,7 от разрушающей нагрузки N_{ult} , трещины образуются в средней сжато-растянутой зоне камня, при нагрузке 0,7...0,9 от разрушающей N_{ult} продолжают развиваться вертикальные трещины и образуются новые, а при нагрузке 0,85...0,95 от N_{ult} в приопорных зонах образуются и развиваются наклонные трещины. Следует отметить, что характер разрушения образцов – хрупкий. По результатам проведенных исследований можно сделать вывод, что характер разрушения высокопустотного камня под нагрузкой в программном комплексе SCAD практически совпал с полученной картиной разрушения при экспериментальном исследовании.

Таблица 1

Номер серии образцов	Среднее значение марки по прочности серии камней при сжатии	Трещинообразующая нагрузка $N_{сгс}$, кН	Разрушающая нагрузка $N_{разр}$, кН	Временное сопротивление $R_{u,ср}$, МПа	Модуль упругости $E_0 = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$, МПа
1	100	243	478	7,65	10928,6
2	100	226	461	7,38	10542,9
3	100	209	444	7,10	10142,9

Далее были проведены исследования работы двухэлементного фрагмента кладки из крупноформатных камней с вертикальным соединением "паз-гребень" с общими размерами в плане 250x250 мм высотой 425

мм (с учетом растворного шва). Результаты испытаний серии из трех двухэлементных фрагментов кладки, сформированных в идентичных условиях, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Номер образца	Прочность материалов кладки, МПа		Трещинообразующая нагрузка $N_{крс}$, кН	Разрушающая нагрузка $N_{разр}$, кН	Временное сопротивление кладки, $R_{ц,ср}$, МПа	Модуль упругости, МПа	Коэффициент Пуассона, $\mu = \frac{\epsilon_{поп}}{\epsilon_{прод}}$	Упругая характеристика $\alpha = \frac{E_0}{R_{ц}}$
	камень	раствор						
1	7,4	14,8	272	430,3	6,9	7651	0,09	1100
2			200	375,7	6	8010	0,13	1340
3			190	329,7	5,3	7290	0,17	1375

Следует отметить, что значения временного сопротивления сжатию кладок из рассматриваемых материалов, определенные теоретически по нормативной методике (табл. 3 – сопоставление теоретических и экспериментальных величин расчетных сопротивлений кладки), примерно на 30%

ниже результатов, полученных экспериментально, что отмечается и другими авторами, которые устанавливают, в частности, ряд поправочных коэффициентов при теоретическом определении прочностных характеристик кладок из пустотно-поризованных керамических камней [13].

Таблица 3

Расчетное сопротивление сжатию кладки, вычисленное экспериментально, кН/см ²	Расчетное сопротивление сжатию кладки, согласно формуле Онищика, по характеристикам образца, кН/см ²	Расчетное сопротивление сжатию кладки по СП 15.13330.2012 с учетом понижающих коэффициентов, кН/см ²
0,23	0,17	0,162

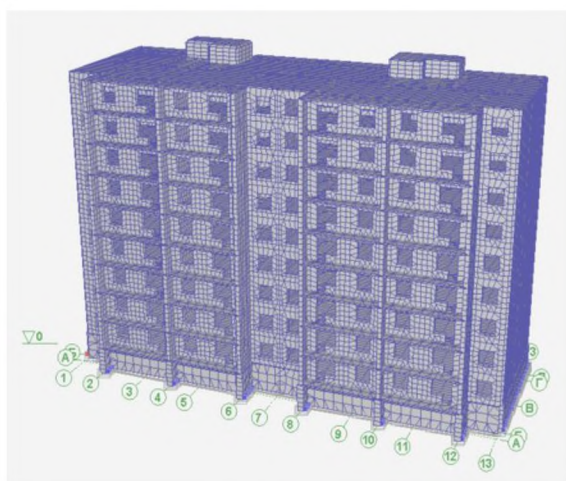


Рис. 3

С целью анализа возможности использования кладки из высокопустотных керамических камней в качестве основного материала несущих теплоэффективных наружных стен была построена модель девятиэтажного жилого дома в программном

комплексе (рис. 3) с высотой этажа 2,8 м и размерами в плане 40,8x12,6 м. Оконные проемы размером 1,3x1,4 м. Для оценки характеристик исследуемого материала рассматривался вариант наружных стен зданий толщиной 380 мм из камней 10,7НФ. Ввиду большого числа элементов и узлов в схеме девятиэтажного здания кладку стен из рассматриваемого материала моделировали не в виде 8 и 6-узловых изопараметрических конечных объемных элементов, а в виде 4 или 3-узловых пластин с заданными жесткостными характеристиками (модуль упругости и коэффициент Пуассона), принятыми по результатам испытаний двухэлементных фрагментов кладок, описанных выше.

Следует отметить, что расчетные усилия, полученные в результате анализа напряженно-деформированного состояния

наружных и внутренних стен модели девятиэтажного дома, имеют достаточно неплохую сходимость с "ручным" расчетом (от 12 до 20%).

Для подробной оценки характера разрушения кладки из высокопустотных керамических блоков была сформирована модель простенка с учетом конфигураций пустот камня. Простенок состоит из блоков 10,7 НФ и имеет размеры $b=1,175$ м, $h=2,42$ м, высота 2,42 м.

ВЫВОДЫ

Таким образом, целесообразным, на наш взгляд, при изучении студентами направления "Строительство" основ расчета и проектирования жилых и гражданских зданий с применением каменных и армокаменных конструкций будет использование программного комплекса SCAD в общей оценке напряженного состояния несущих стен на примере моделей жилых и гражданских зданий. Кроме того, выявленные наиболее нагруженные участки стен предлагается рассматривать отдельно с сопоставлением результатов "ручного" расчета и с использованием программного комплекса по описанной выше схеме.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гагарин В.Г., Дмитриев К.А. Учет теплотехнических неоднородностей при оценке теплозащиты ограждающих конструкций в России и европейских странах // *Строительные материалы*. – 2013, №3. С. 14...16.
2. Гайсин А.М., Гареев Р.Р., Бабков В.В., Недосеко И.В., Самоходова С.Ю. Двадцатилетний опыт применения высокопустотных вибропрессованных бетонных блоков в Башкортостане // *Строительные материалы*. – 2015, № 4. С. 82...86.
3. Бедов А.И., Бабков В.В., Гайсин А.М., Габитов А.И. Опыт эксплуатации жилых и гражданских зданий с теплоэффективными наружными стенами в климатических условиях Республики Башкортостан // *Вестник МГСУ*. – 2011, № 2. Том 1. С. 89...94.
4. Бедов А.И., Гайсин А.М., Габитов А.И., Салов А.С., Самоходова С.Ю. Определение теплотерь наружных ограждений в местах примыкания оконных блоков к кирпичным стенам при реконструкции // *Промышленное и гражданское строительство*. – 2015, №12. С. 28...32.
5. Ицук М.К. Отечественный опыт возведения зданий с наружными стенами из облегченной кладки. – М.: Изд-во РИФ "Стройматериалы", 2009.

6. Гайсин А.М., Самоходова С.Ю., Недосеко И.В., Пайметькина А.Ю. Сравнительная оценка удельных теплотерь через элементы наружных стен жилых зданий, определяемых по различным методикам // *Жилищное строительство*. – 2016, № 5. С.36...40.

7. Тамразян А.Г., Аветисян Л.А. Расчет внецентренно-сжатых железобетонных элементов на кратковременную динамическую нагрузку // *Строительство: наука и образование*. – 2013, № 4. С.2.

8. Tamrazyan A. Reduce the impact of dynamic strength of concrete under fire conditions on bearing capacity of reinforced concrete columns // *Applied Mechanics and Materials*. – Т. 475..476, 2014. P.1563...1566.

9. Салов А.С. Особенности автоматизации технологического проектирования в строительстве // *Вестник научных конференций*. – 2016, № 1-1 (5). С. 86...87.

10. Пангаев В.В., Албаум Г.Н., Федоров А.В., Табанюхова М.В. Модельные исследования напряженно - деформированного состояния каменной кладки при сжатии // *Изв. вузов. Строительство*. – 2003, №2. С. 24...29.

11. Донченко О.М., Дегтев И.А. К развитию теории трещиностойкости и сопротивления кладки при сжатии // *Изв. вузов. Строительство*. – 2000, №10. С. 16...20.

12. Gorshkov A., Vatin N., Nemova D., Tarasova D. Definition of the overturning and holding moments for floor-by-floor leaning walls made from aerated concrete blocks // *Applied Mechanics and Materials*. – Т.633...634, 2014. P. 897...903.

13. Соколов Б.С., Антаков А.Б., Фабричная К.А. Комплексные исследования прочности пустотелопоризованных керамических камней и кладок при сжатии // *Вестник гражданских инженеров СПбГАСУ*. – 2012, № 5(34). С.65...71.

REFERENCES

1. Gagarin V.G., Dmitriev K.A. Uchet teplotehnikeskikh neodnorodnostej pri ocenke teplozashhity ograzhdajushhhkh konstrukcij v Rossii i evropejskikh stranah // *Stroitel'nye materialy*. – 2013, №3. S. 14...16.
2. Gajsin A.M., Gareev R.R., Babkov V.V., Nedoseko I.V., Samohodova S.Ju. Dvadcatiletnij opyt primenenija vysokopustotnyh vibropressovannyh betonnyh blokov v Bashkortostane // *Stroitel'nye materialy*. – 2015, № 4. S. 82...86.
3. Bedov A.I., Babkov V.V., Gajsin A.M., Gabitov A.I. Opyt jekspluatacii zhilyh i grazhdanskikh zdaniy s teplojeffektivnymi naruzhnyimi stenami v klimaticheskikh uslovijah Respubliki Bashkortostan // *Vestnik MGSU*. – 2011, № 2. Tom 1. S. 89...94.
4. Bedov A.I., Gajsin A.M., Gabitov A.I., Salov A.S., Samohodova S.Ju. Opredelenie teplopoter' naruzhnyh ograzhdenij v mestah primykaniya okonnyh blokov k kirpichnym stenam pri rekonstrukcii // *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. – 2015, №12. С. 28...32.

5. Ishhuk M.K. Otechestvennyj opyt vozvedeniya zdaniy s naruzhnymi stenami iz oblegchennoj kladki. – M.: Izd-vo RIF "Strojmateriary", 2009.
6. Gajsin A.M., Samohodova S.Ju., Nedoseko I.V., Pajmet'kina A.Ju. Sravnitel'naja ocenka udel'nyh teplopoter' cherez jelementy naruzhnyh sten zhilyh zdaniy, opredeljaemyh po razlichnym metodikam // Zhi-lishhnoe stroitel'stvo. – 2016, № 5. S.36...40.
7. Tamrazjan A.G., Avetisjan L.A. Raschet vne-centrenno-szhatyh zhelezobetonnyh jelementov na kratkovremennuju dinamicheskiju nagruzku // Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie. – 2013, № 4. S.2.
8. Tamrazyan A. Reduce the impact of dynamic strength of concrete under fire conditions on bearing capacity of reinforced concrete columns // Applied Mechanics and Materials. – T. 475..476, 2014. P.1563...1566.
9. Salov A.S. Osobennosti avtomatizacii tehnologicheskogo proektirovaniya v stroitel'stve // Vestnik nauchnyh konferencij. – 2016, № 1-1 (5). S. 86...87.
10. Pangaev V.V., Albaut G.N., Fedorov A.V., Tabanjuhova M.V. Model'nye issledovaniya naprjazhenno-deformirovannogo sostojaniya kamennoj kladki pri szhatii // Izv. vuzov. Stroitel'stvo. – 2003, №2. S.24...29.
11. Donchenko O.M., Degtev I.A. K razvitiyu teorii treshhinostojkosti i soprotivlenija kladki pri szhatii // Izv. vuzov. Stroitel'stvo. – 2000, №10. S. 16...20.
12. Gorshkov A., Vatin N., Nemova D., Tarasova D. Definition of the overturning and holding moments for floor-by-floor leaning walls made from aerated concrete blocks // Applied Mechanics and Materials. – T.633...634, 2014. P. 897...903.
13. Sokolov B.S., Antakov A.B., Fabrichnaja K.A. Kompleksnye issledovaniya prochnosti pustotelo-porizovannyh keramicheskikh kamnej i kladok pri szhatii // Vestnik grazhdanskih inzhenerov SPbGASU. – 2012, № 5(34). S.65...71.

Рекомендована Ученым советом МГСУ. Поступила 28.04.17.