

DOI: 10.34031/2618-7183-2021-4-6-26-47

*Жуйков С.В., \*архитектор,  
Южно-Уральский государственный университет, Россия*  
\*Ответственный автор E-mail: renderwork74@gmail.com

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАНОТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

**Аннотация:** Россия имеет развитую промышленность строительных материалов, которая на сегодня реализует энерго- и ресурсосберегающую модель своего развития. Внедрение государственной политики ресурсосбережения осуществляется по двум основным направлениям: первое направление заключается в экономии ресурсов при производстве материалов, второй – в увеличении выпуска энергоэффективных материалов, которые позволяют экономить энергоносители при их эксплуатации. Современное строительство в России ориентируется на европейские строительные стандарты, что, в свою очередь, предусматривает сооружение энергосберегающих зданий с минимальным потреблением энергии от внешних источников. Это обеспечивается путем использования при возведении наружных стен конструкционно-теплоизоляционных материалов. В современных конструкционно-теплоизоляционных материалов для энергосберегающего строительства предъявляются высокие требования по их теплотехническим свойствам, механической прочности и уровня комфортности. С точки зрения одновременного удовлетворения этих требований очевидные преимущества перед другими материалами, в частности ячеистыми бетонами, имеют керамические материалы, которые при почти одинаковом уровне теплопроводности характеризуются наименьшей гигроскопичностью и существенно большей прочностью. Объективной перспективой развития конструкционно-теплоизоляционной керамики является производство пустотных керамических камней увеличенной тепловой эффективности для их применения в экономичных однослойных наружных стеновых конструкциях без дополнительного утепления. Продукция единичных украинских производителей и даже импортные аналоги самого известного европейского производителя (Компания Wienerberger, Австрия) при их использовании в однослойных стенах не обеспечивают нормативные требования к сопротивлению теплопередаче кладки для первой температурной зоны России, которая занимает большинство территории (60%). Это требует усовершенствования отечественной продукции в направлении улучшения ее теплотехнических характеристик (снижения теплопроводности и увеличения термического сопротивления).

**Ключевые слова:** нанотехнологии, проектирование, строительство бетон, климатическая зона

### Введение

Энергоэффективные технологии для возведения и реконструкции зданий начали развиваться еще в 80-е годы в европейских странах и странах Северной Америки. Предпосылками деятельности по повышению энергоэффективности зданий встала необходимость экономии природных ресурсов, постоянный рост цен на энергоносители, а также обязательства по сокращению выбросов парниковых газов в атмосферу, что предусмотрено Киотским протоколом [2].

В России класс энергетической эффективности домов регламентируется требованиями к теплотехническим показателям сооружений, изложенных в СНиП 2016 года. Этим документом установлены требования к теплоизоляционным оболочкам зданий и сооружений, их расчету для обеспечения рационального использования энергетических ресурсов на отопление и охлаждение помещений, нормативных санитарно-гигиенических параметров микроклимата помещений, долговечности конструкций и тому подобное [5]. По этим нормам каждое здание должно иметь свой класс энергетической эффективности. Он подтверждается энергетическим паспортом и устанавливается на основе сравнения нормативных максимальных ( $E_{max}$ , кВт/ч·м<sup>2</sup>) и фактических ( $E_F$ ) значений интегральной годовой энергопотребности здания (на отопление, охлаждение, горячее водоснабжение) [10]. В целом энергоэффективность здания определяется условием  $ЭР \leq E_{max}$ , а для установления класса энергоэффективности рассчитывается относительный показатель энергопотребления  $[(ЭР - E_{max}) / E_{max}]$ , что исчисляется в процентах и может иметь как положительные, так и отрицательные значения [13].

Энергетическая паспортизация домов предполагает присвоение дому определенного класса энергетической эффективности (A, B, C, D, E, F, G). Буква «A» соответствует домам с лучшим относительным показателем энергопотребления (-50 %), буква «G» – домам, которые имеют худшие значения этого показателя (76% и более). В отличие от России в Европе принята своя классификация зданий по уровню потребленной энергии [4].

Современные дома низкого потребления энергии, пассивные и активные строятся не так давно (с 2002 года) [7]. В Европе не разрешается строительство объектов более низкого стандарта, чем дом с низким потреблением энергии, а такие страны, как, например, Дания, Финляндия, Германия, приняли даже целевые государственные программы по приведению объектов регулярной застройки к условно пассивному уровню (дома ультранизкого потребления – до 30 кВт·ч/м<sup>2</sup> в год). Дома с нулевым потреблением энергии от внешних источников потребляют исключительно ту энергию, которую сами производят (дом нулевой энергии), а активные дома «энергия плюс» вырабатывают энергии больше, чем потребляют благодаря солнечным батареям, тепловым насосам и другим видам специального оборудования [11].

В России для характеристики зданий с точки зрения энергоэффективности используется несколько иная терминология. В научно-технической литературе употребляются различные понятия, что требует их уточнения по крайней мере в пределах данной работы [9]. Так, по данным автора все здания, которые потребляют энергию от внешних источников в небольшом количестве (не более 60 кВт·ч/м<sup>2</sup> в год), называются энергосберегающими. Это соответствует европейскому дому низкого потребления энергии [3]. Дом с нулевым потреблением энергии от внешних источников называют энергопассивным, а дом, который вырабатывает энергию с избытком за счет возобновляемых источников энергии – энергоэффективным [8]. Для последних домов можно оценить их эффективность как источники энергии. При таком подходе можно отметить, что энергоэффективных и энергопассивных домов в России единицы, а современные жилые и общественные здания последних лет строительства можно отнести к энергосберегающим [14].

Анализ структуры потерь тепловой энергии через отдельные ограждающие конструкции свидетельствует, что наибольшая доля теплопотерь (30-49%) приходится на стеновые материалы, теплопотери через окна составляют 25-35%, а сквозь цокольные и чердачные перекрытия – 10-18%. Поэтому вопрос применения теплоэффективных стеновых материалов приобретает важное значение для повышения класса энергетической эффективности дома [6]. Основное функциональное назначение этих материалов – повышение сопротивления теплопередаче строительной конструкции, что достигается за счет низкой теплопередаче и плотности материалов. Именно эти свойства являются определяющими для оценки эффективности материалов с точки зрения тепловой изоляции и установления их группы по теплотехническим характеристикам [12].

### Методы и материалы

Номенклатура современных строительных материалов для возведения наружных стен является достаточно широкой и представлена искусственными изделиями различной пустотности и геометрии, материалами в виде плит, рулонов и тому подобное [15]. В этих строительных нормах приводится характеристика материалов по показателям плотности, содержания влаги и теплопередаче в нормальных условиях эксплуатации (влажность 50-60%, температура 12 – 240С). Согласно такой характеристике, они делятся на теплоизоляционные, конструкционно-теплоизоляционные и конструкционные [1].

Конструкционные материалы – конструкционные бетоны, силикатный, керамический и полнотелый кирпич – по причине высокой теплопроводности ( $\lambda = 0,52 - 2,04$  Вт/(м·К)) не могут использоваться для теплоэффективных стеновых конструкций с высоким сопротивлением теплопередаче или требуют использования дополнительных слоев теплоизоляции [18]. Из группы теплоизоляционных материалов наименьшей теплопроводностью характеризуются волокнистые (минеральная вата) и полимерные теплоизоляционные материалы, которые используются в качестве утеплителей, а также пеностекло ( $\lambda = 0,043 - 0,085$  Вт/(м·К)). Вместе с тем к их основным недостаткам следует отнести: постепенное «проседание» со временем минераловатных утеплителей под действием собственного веса и «пыления» в процессе монтажа, хрупкость пенополистирольных плит, их пожароопасность и способность выделять токсичные соединения при возгорании [16]. Для пенополиуретана характерна неустойчивость к прямому воздействию солнечного света, для пеностекла и вспененного пенополиэтилена – недостаточная паропроницаемость [20]. Но главным недостатком указанных материалов является их повышенная гигроскопичность в нормальных условиях эксплуатации, которая доходит даже до 30% для вспененных органических материалов, что снижает теплозащитные свойства и долговечность конструкций [17].

Современные конструкционно-теплоизоляционные материалы представлены ячеистыми и легкими бетонами, древесиной, керамзитшлакобетонными блоками и керамическими изделиями различной полости. Плотность этих изделий изменяется от минимального значения для древесины 500 кг/м<sup>3</sup> до максимального значения 1800 кг/м<sup>3</sup> для керамзитобетона [19]. Наименьшей теплопроводности из этой группы материалов характеризуется горючая древесина (для сосны  $\lambda = 0,18$  Вт/(м·К)), наибольшей – керамзитобетон ( $\lambda = 0,92$  Вт/(м·К)). Уровень гигроскопичности конструкционно-теплоизоляционных материалов в целом ниже теплоизоляционных, но отдельные из них (ячеистые и легкие бетоны) характеризуются высоким содержанием влаги в нормальных условиях эксплуатации – 15-22%.

### Результаты и обсуждения

В настоящее время существует тенденция к производству КТКМ в виде крупноразмерных камней с тонкими внутренними перегородками и сложной картиной пустотности. Это объясняется стремлением к повышению тепло- и звукоизоляции и подтверждается актуальными каталогами продукции известных производителей. При анализе рекламной информации можно сделать вывод, что производители ставят в зависимость звукоизоляцию изделий от геометрии пустот, а их теплопроводность – почти в прямую зависимость от пустотности изделий. В то же время, исследованиями авторов при испытаниях пустотелой керамики в фрагменте стены в климатической камере было определено, что теплопроводность не находится в прямой зависимости от пустотности. Объясняется это тем, что при кладке стены пустоты изделия неизбежно частично заполняются строительным раствором, что при его проникновении на глубину лишь 3 см повышает  $\lambda$  на 33-44%. По данным авторов высокая пустотность изделий усложняет технологию кладки и снижает ее прочность по той причине, что кладку следует вести на толстом слое раствора.

К этому следует также добавить, что высокая пустотность изделий накладывает жесткие требования к технологическим свойствам керамических масс, в частности к их пластичности. В первом разделе отмечалось, что получение качественного керамического черепка высокопустотных изделий возможно при использовании глин с числом пластичности не менее 15. Собственный анализ этого свойства кирпично-черепичных глин показал, что такие глины в России довольно дефицитны. На рис. 1. приведены данные о числах пластичности удобоваримых глин, которые в настоящее время используются в кирпичном производстве и представляют собой выборку из 34 пород.

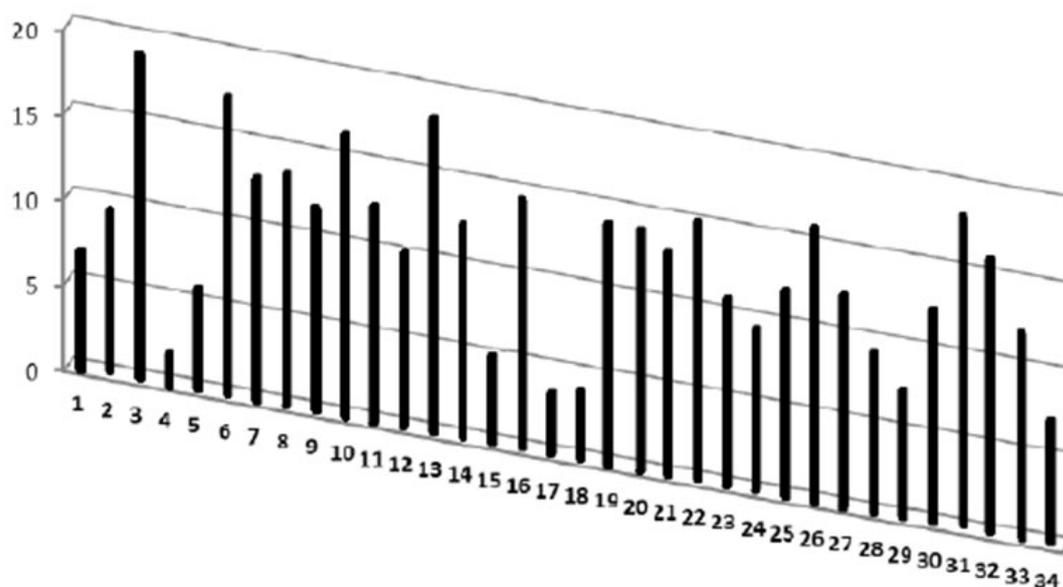


Рис. 1. Пластичность глинистого сырья, используемого на кирпичных заводах

Fig. 1. Plasticity of clay raw materials used in brick factories

Исследованных ранее (2018-2020 гг) в лаборатории функциональной керамики и защитных композиционных покрытий кафедры технологии керамики, огнеупоров, стекла и эмалей ЮрГЭУ. Данные о технологических свойствах глинистых пород размещены в базе данных «Глины», которая является частью автоматизированной системы обработки информации в отношении сырья природного и техногенного происхождения, разработанной в виде оригинального программного продукта. Из рисунка можно увидеть, что глины с пластичностью 15 составляют меньшинство (лишь 20% выборки), в то время как породы с этим показателем 10-15 – уже 47% выборки.

Относительно формирования крупноразмерных изделий сложного профиля надо отметить, что этот процесс требует применения современных мощных прессов с экструзионными системами сложной конструкции. Рама и керны таких прессов изготавливаются из легированных сталей, твердых сплавов, износостойкой керамики, металлов с карбид-вольфрамовыми покрытиями. Например, по данным одного из известных производителей мундштуков для таких прессов – итальянской фирмы Filiere Torres – конструкция современного мундштука предполагает 175 кернов на один выход (рис. 2), что обычно повышает стоимость этих рабочих органов пресса и самого пресса. Кроме этого, экструзия изделий происходит с большим прессовым усилием для изделий большей пустотности. В свою очередь, это увеличивает удельные затраты

энергии на формирование, а необходимое уменьшения частоты вращения вала шнека снижает производительность пресса (на каждый процент пустотности частоту необходимо уменьшать на 0,5-0,6%). Эти параметры работы пресса еще более зависимы от влажности керамических масс и при использовании, например, полужесткой экструзии высокопустотных изделий соответствующим образом ухудшаются.

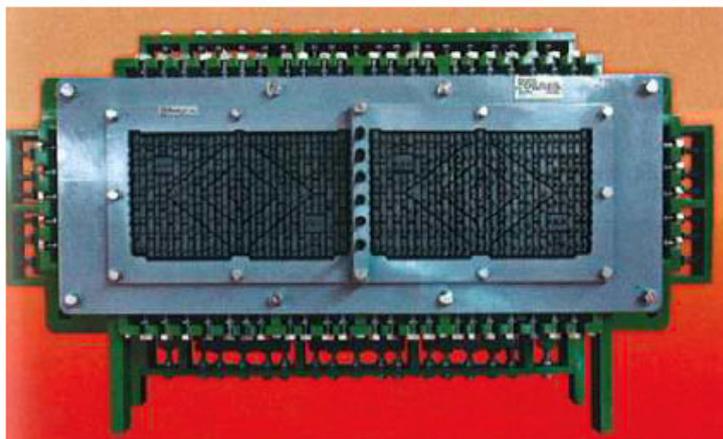


Рис. 2. Мундштук пресса для экструзии «с широким выходом» фирмы Filiere Torres  
Fig. 2. Mouthpiece of the extrusion press "with a wide outlet" by Filiere Torres

Все вышеуказанное в комплексе приводит к выводу, что снижение теплопроводности изделий только за счет пустотности не является оправданным с инженерно-строительной и сырьевых-ресурсной точек зрения. Такое решение также является невыгодным с позиции используемого прессового оборудования, которое требует больших капиталовложений при реконструкции или организации производства КТБК в России. В условиях отечественного сырьевого и ресурсного потенциала снижения теплопроводности целесообразно достигать комбинированным способом за счет создания пористой структуры каркаса изделия и уменьшения пустотности.

Для подтверждения или опровержения этой гипотезы была проведена теоретическая оценка теплозащитных свойств двух различных керамических моделей, которые имеют вид, приведенный на рис. 3. Модели отличались процентом пустотности и плотностью керамического материала – одна модель имела пустотность 60% и условно плотную (непористую) стенку, вторая – пустотность 40% и пористую стенку (общая пористость 50%). Габаритные размеры моделей были одинаковыми ( $l \times b \times h = 300 \text{ мм} \times 250 \text{ мм} \times 238 \text{ мм}$ ).

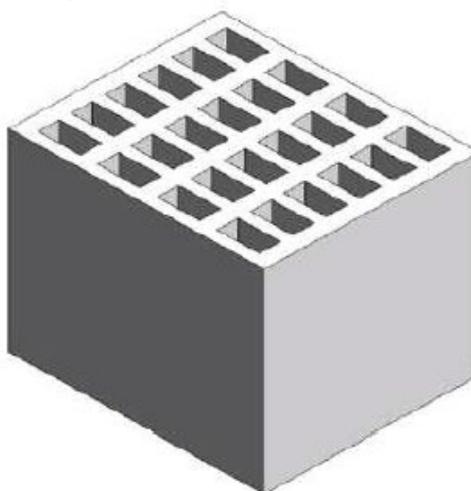


Рис. 3. Общий вид модели  
Fig. 3. General view of the model

Для сравнительного анализа тепло-защитных свойств моделей был рассчитан их эквивалентный коэффициент теплопроводности  $\lambda_{\text{св}}$ . При расчетах были сделаны следующие допущения: коэффициент теплопроводности плотного керамического материала  $\lambda_{\text{кер}} = 0,7 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$  (типичный для полнотелого кирпича), коэффициент теплопроводности поризованного материала  $\lambda_{\text{пкер}} = 0,35 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ , коэффициент теплопроводности воздуха  $\lambda_{\text{пов}} = 0,0257 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ .

С использованием программного продукта SolidWorks были спроектированы конструкции моделей (модель А и модель Б), которые обеспечивали заданную пустотность (60 % и 40 %) при постоянных и одинаковых габаритных размерах. Вид сверху моделей с их геометрическими параметрами приведен на рис. 4 и 5. Пример расчета  $\lambda_{\text{св}}$  для модели а приводится ниже.

Для модели тепловой поток  $P$  представляет собой сумму двух тепловых потоков:

$$P = P_1 + P_2 \quad (1)$$

где  $P_1$  – суммарный тепловой поток, который проходит сквозь сплошной керамический материал (без участков, прерываемых пустотами);

$P_2$  – суммарный тепловой поток, который проходит по участкам с керамическим материалом и пустотами.

Тепловые потоки будут рассчитываться по формулам (2) и (3).

$$P_1 = \frac{\lambda_{\text{кер}} S_1}{\delta} \Delta T = \frac{1}{R_1} \Delta T \quad (2)$$

$$P_2 = \frac{\lambda_2 S_2}{\delta} \Delta T = \frac{1}{R_2} \Delta T \quad (3)$$

где  $\lambda_{\text{кер}}$  – коэффициент теплопроводности керамического материала на пути теплового потока  $P_1$ , Вт/(м·К);

$S_1, S_2$  – площади боковой стенки модели, сквозь которые проходят тепловые потоки  $P_1$  и  $P_2$ , м<sup>2</sup>;

$\Delta T$  – разность температур боковых стенок модели, сквозь которые проходит тепловой поток, К;

$\delta$  – расстояние между боковыми стенками модели, м;

$\lambda_2$  – эквивалентный коэффициент теплопроводности модели на пути теплового потока  $P_2$ , Вт/(м·К);

$R_1, R_2$  – тепловые опоры на пути тепловых потоков  $P_1$  и  $P_2$ , К/Вт.

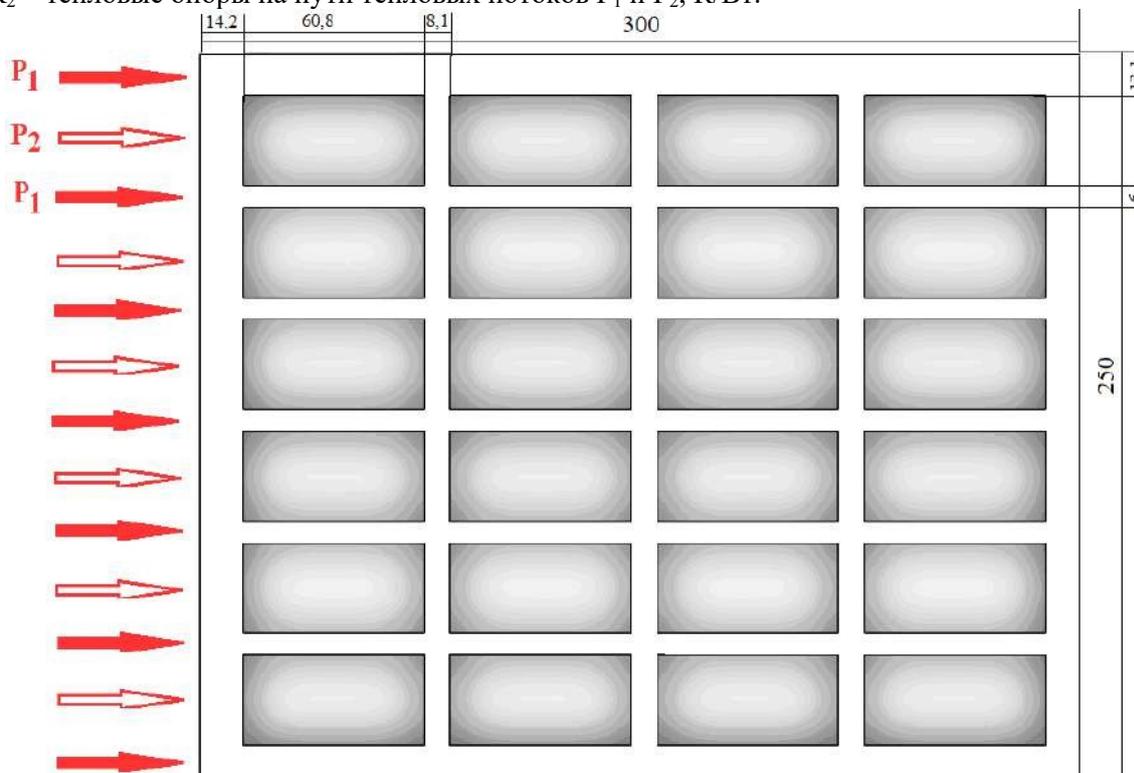


Рис. 4. Модель А с плотной керамической стенкой и пустотностью 60% (вид сверху)

Fig. 4. Model A with a dense ceramic wall and a voidness of 60% (top view)

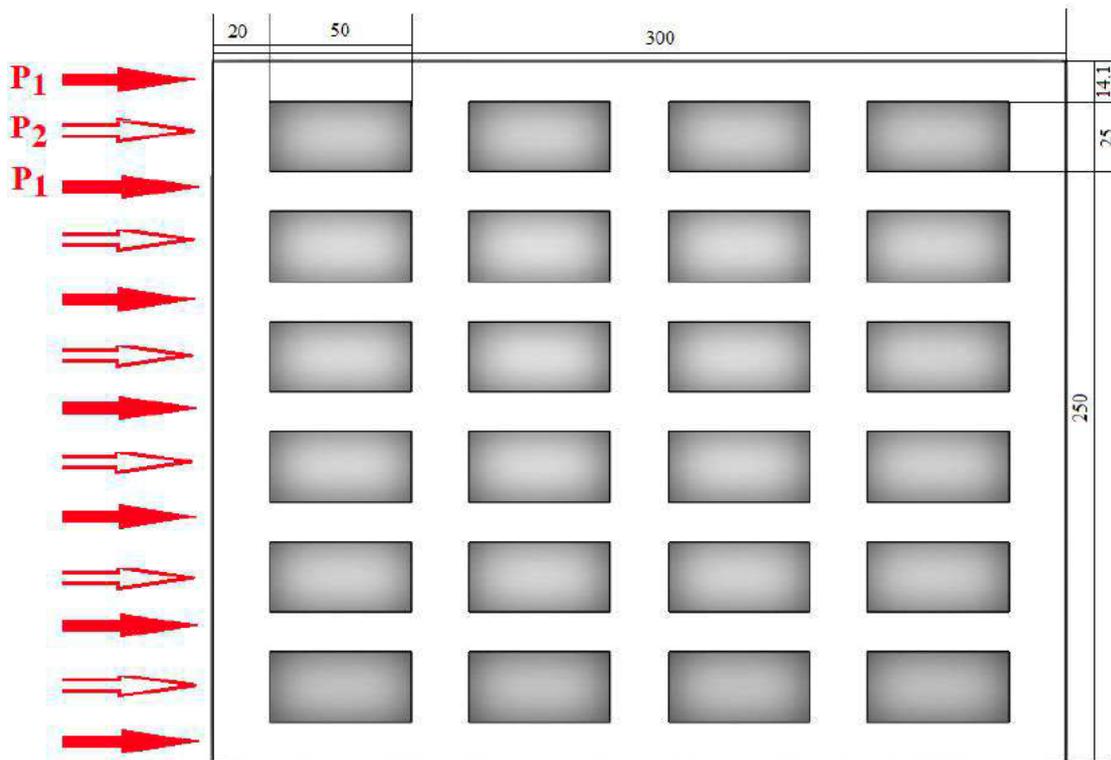


Рис. 5. Модель Б с пористой керамической стенкой и пустотностью 40 % (вид сверху)  
Fig. 5. Model B with a porous ceramic wall and a voidness of 40% (top view)

Исходя из геометрических параметров модели, а (рис. 4), можем рассчитать площади боковой стенки модели  $S_1$  и  $S_2$ , сквозь которые проходят тепловые потоки  $P_1$  и  $P_2$  соответственно:

$$S_1 = 0,238 \cdot 0,0131 \cdot 2 + 0,238 \cdot 0,005 \cdot 5 = 0,0134 \text{ м}^2 \quad (4)$$

$$S_2 = S_{\text{заг}} - S_1 = 0,250 \cdot 0,238 - 0,0134 = 0,0595 - 0,0134 = 0,0461 \text{ м}^2 \quad (5)$$

Подставляя формулы (3) и (6) в формулу (2), получим:

$$P = \frac{1}{R_1} \Delta T + \frac{1}{R_2} \Delta T = \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \Delta T = \frac{1}{R_{\text{екв}}} \Delta T = \frac{\lambda_{\text{екв}} S_{\text{заг}}}{\delta} \Delta T \quad (6)$$

где  $R_{\text{екв}}$  –тепловое сопротивление на пути теплового потока  $P$ , К / Вт.

Исходя из формулы (2), тепловое сопротивление  $R_1$  будет равно:

$$R_1 = \frac{\delta}{\lambda_{\text{кер}}} \frac{1}{S_1} = \frac{0,3}{0,7} \frac{1}{0,0134} = 31,98 \text{ К / Вт} \quad (7)$$

Исходя из формулы (2), тепловое сопротивление  $R_2$  будет равно:

$$R_2 = \frac{\delta}{\lambda_2} \frac{1}{S_2} = \left( \frac{\delta_1}{\lambda_{\text{кер}}} 2 + \frac{\delta_2}{\lambda_{\text{нов}}} 4 + \frac{\delta_3}{\lambda_{\text{кер}}} 3 \right) \frac{1}{S_2} = \left( \frac{0,0142}{0,7} 2 + \frac{0,0608}{0,0257} 4 + \frac{0,0081}{0,7} 3 \right) \times \frac{1}{0,0461} = \frac{9,5387}{0,0461} = 206,91 \text{ К / Вт} \quad (8)$$

Из формулы (6) получается:

$$\frac{1}{R_{\text{екв}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{1}{31,98} + \frac{1}{206,91} = 0,0358 \text{ Вт / К} \quad (9)$$

Тогда

$$R_{евк} = \frac{1}{0,0358} = 27,93K / Bm.$$

Если, как следует из формулы (6),

$$R_{евк} = \frac{\delta}{\lambda_{евк} S_{заг}}, \text{ то } \lambda_{евк} = \frac{\delta}{R_{евк} S_{заг}}$$

Тогда для модели А:

$$\lambda_{евк} = \frac{0,3}{27,93 \cdot 0,0595} = 0,18Bm / (мК).$$

Аналогичным образом был рассчитан эквивалентный коэффициент теплопроводности для модели Б с пористой керамической стенкой и пустотностью 40% с геометрическими параметрами, приведенными на рис. 5. Для этой модели значение  $\lambda_{евк}$  составило 0,16 Вт/(м·К).

Итак, расчеты показали, что уменьшение пустотности модельных изделий на 20% при условии пористой керамической стенки не только не ухудшает, но и улучшает теплозащитные свойства модели, уменьшая коэффициент теплопроводности на 12%. При условии меньшего  $\lambda_{пкер}$ , который при расчетах принимался на уровне 0,35 Вт/(м·К), эта разница была бы более существенной. Это означает, что с точки зрения теплопроводности при одинаковой геометрии пустот оптимальной конструкцией изделия является модель с поризованным керамическим каркасом и меньшей пустотностью. Меньше пустотность, наверное, должен улучшать механические свойства изделий, однако в случае пористой керамической стенки может быть и наоборот, и именно поэтому этот вопрос требует анализа.

Для оценки механических свойств модельных изделий (модели А, Б) было осуществлено компьютерно-имитационное моделирование их поведения под действием статических механических нагрузок. Основной задачей такого моделирования было сравнение деформативно-прочностных качеств моделей на основе анализа их напряженно-деформированного состояния под различным силовым нагрузкам.

Таковую задачу решали путем построения трехмерных моделей с использованием программного комплекса Ansys Workbench, который позволяет решать различные инженерные задачи, в том числе в области строительной механики с использованием метода конечных элементов. В программу закладывали плотность поризованного и непоризованного керамического материала (density), а также упругие характеристики (модуль Юнга (Young's Modulus), коэффициент Пуассона (Poisson's Ratio)). Другие модули керамического материала, такие как модуль сдвига (Shear Modulus) и модуль объемной упругости (Bulk Modulus) определялись самой программой. На рис. 6, 7 приведены опытные модели и показана приложенная нагрузка  $C \downarrow$ , которая подается на их верхние плоскости и распределена по всей плоскости. Синим цветом на этих рисунках обозначена фиксированная нижняя плоскость модельных изделий.

Разбивка моделей на концево-элементные сетки показано на рис. 8, где также указано количество узлов (Nodes) и самих конечных элементов (Elements). Заложенные в программу и определенные ею свойства керамического материала моделей приведены на рис. 9. Исходя из геометрических размеров моделей ( $l \times b \times h = 300\text{мм} \times 250\text{мм} \times 238\text{мм}$ ) и объема пустот, были рассчитаны объемы собственно керамического материала и массы модельных изделий (рис. 10).

Для имитации поведения моделей под механической нагрузкой, к ним прикладывали давление, варьировался от 3,5 МПа до значения, при котором возникали необратимые деформации, которые свидетельствовали о начале разрушения. За оценочный критерий прочности моделей был принят их коэффициент запаса прочности – величина, широко используемая при проектировании деталей машин, элементов сооружений и т.д.

Каждый материал должен иметь запас прочности для гарантии прочности на случай любых неточностей, возникающих при проектировании и эксплуатации конструкций. Именно этот запас прочности обеспечивает безотказную работу материала (изделия) при его эксплуатации.

Коэффициент запаса прочности модели (КЗММ) – это безразмерная величина, которая представляет собой отношение предельной нагрузки, по которому будет происходить ее разрушение, к расчетной нагрузке в конкретной точке модели, вызванное приложенным давлением. В данном анализе за предельную нагрузку был принят предел прочности при сжатии изделий (7,5 МПа) как допустимая нагрузка для керамического камня марки М75.

Также при исследованиях было принято, что КЗММ должен быть равен 1,4 (референтное значение) по аналогии со стандартным значением этого коэффициента, что используется в машиностроении. Это значит, что с точки зрения прочности моделей приемлемой ситуацией будет такая, когда образованные под внешним давлением напряжения будут в 1,4 раза меньше граничное напряжение.

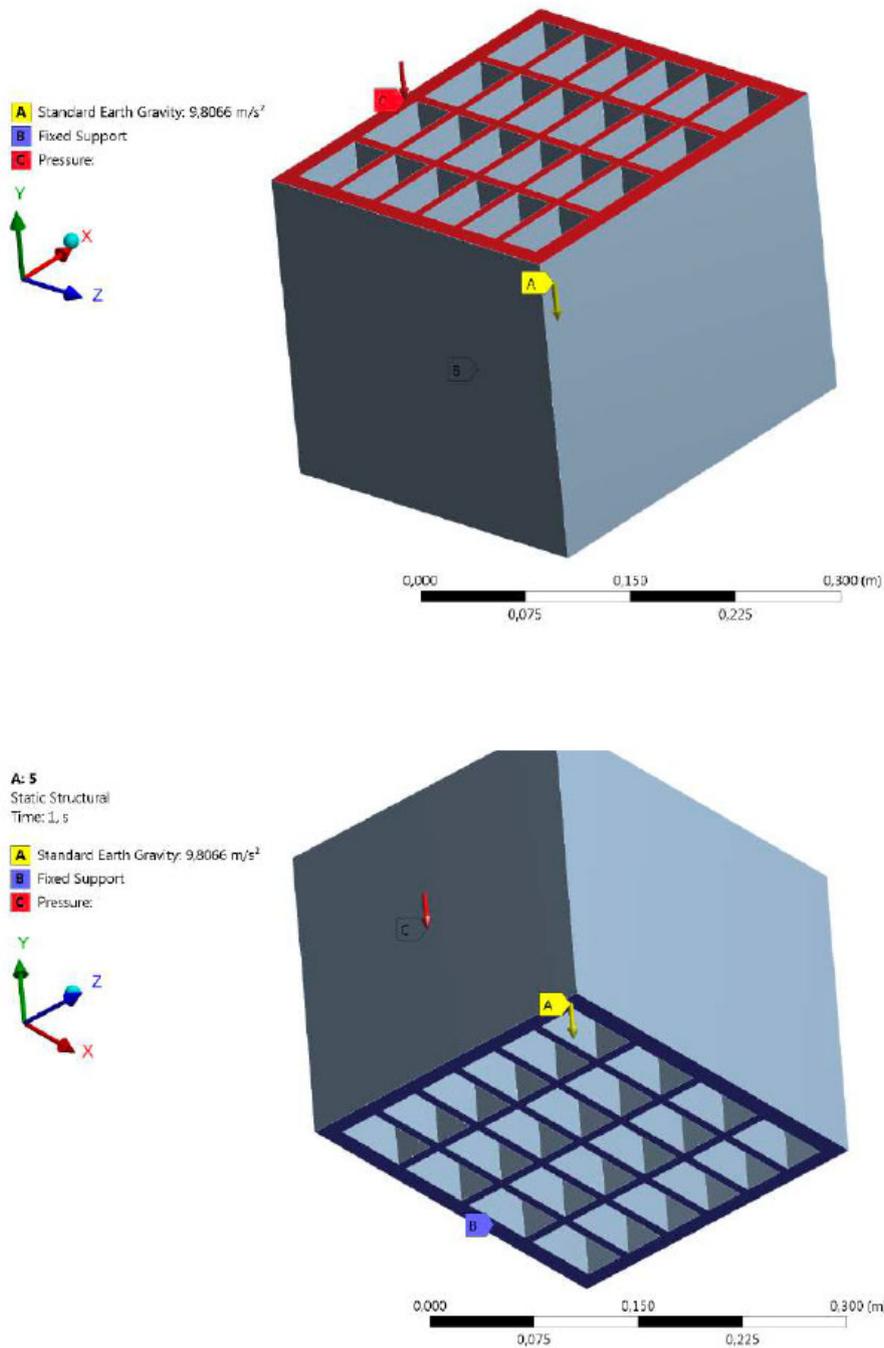


Рис. 6. Модель А с приложенным нагрузкам  
Fig. 6. Model A with applied loads

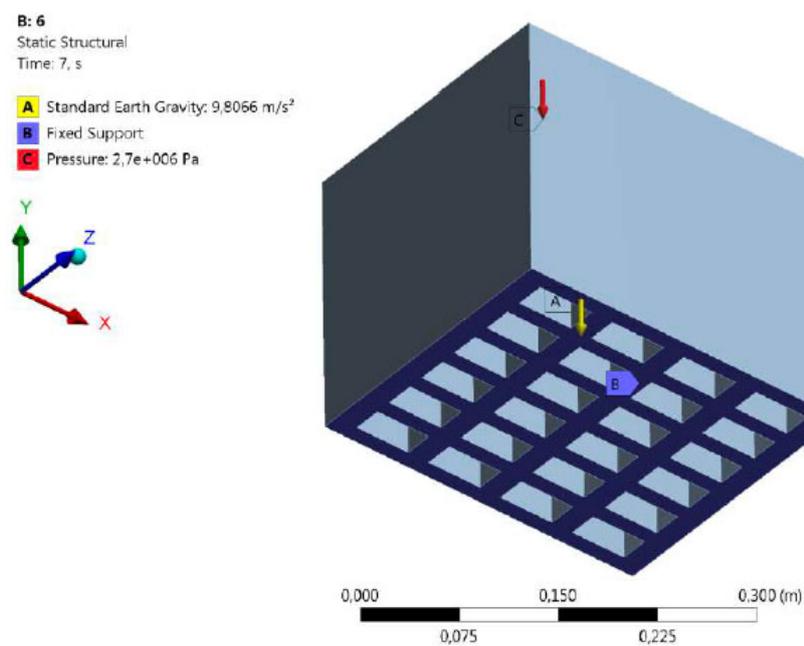
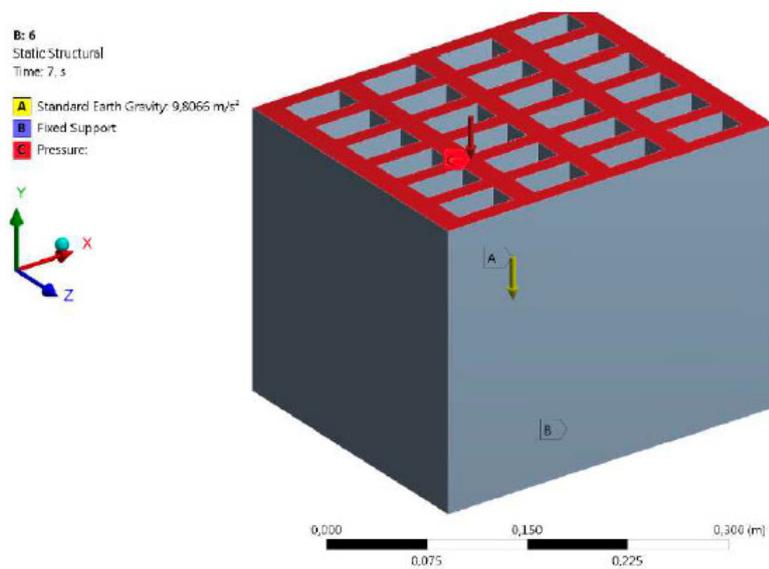


Рис. 7. Модель Б с приложенной нагрузкой  
Fig. 7. Model B with applied load

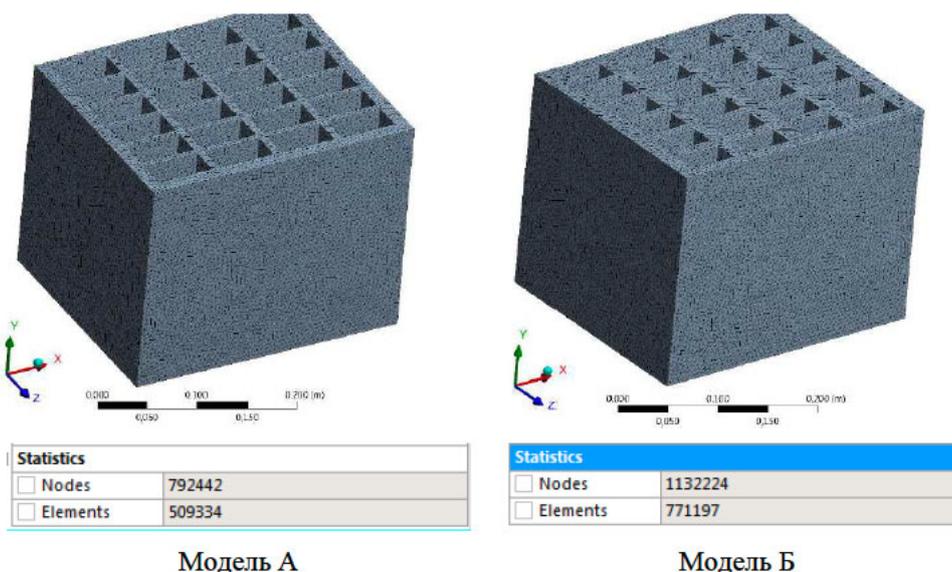


Рис. 8. Конечно-элементные сетки моделей и их параметры  
Fig. 8. Finite element grids of models and their parameters

Properties of Outline Row 3: Ceramic_Poroterm K1ma			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	1948	kg m <sup>-3</sup>
4	Isotropic Elasticity		
5	Derive from	Young's Modulus and Poisson...	
6	Young's Modulus	3E+09	Pa
7	Poisson's Ratio	0,25	
8	Bulk Modulus	2E+09	Pa
9	Shear Modulus	1,2E+09	Pa
10	Tensile Yield Strength	7,5E+06	Pa

Модель А

Properties of Outline Row 3: Ceramic_Poroterm K1ma			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	1200	kg m <sup>-3</sup>
4	Isotropic Elasticity		
5	Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio	
6	Young's Modulus	2,7E+09	Pa
7	Poisson's Ratio	0,23	
8	Bulk Modulus	1,6667E+09	Pa
9	Shear Modulus	1,0976E+09	Pa
10	Tensile Yield Strength	7,5E+06	Pa

Модель Б

Рис. 9. Используемые программой свойства керамического материала моделей  
Fig. 9. Properties of ceramic material models used by the program

Volume	7,1478e-003 m <sup>3</sup>	Volume	1,071e-002 m <sup>3</sup>
Mass	13,924 kg	Mass	12,852 kg

Модель А

Модель Б

Рис. 10. Физические параметры керамического материала моделей  
Fig. 10. Physical parameters of the ceramic material of the models

На рис. 11 и 12 приведены результаты нагрузки изделий различным давлением в виде 3D моделей с выделенными цветом зонами напряжений. Цветовая шкала на рисунках показывает запас прочности в конкретной области модели и пределы изменения КЗМ, которые для каждого рассматриваемого варианта являются своими. Красный цвет на шкале означает низкий запас прочности зоны, где будет происходить разрушение. Оранжевый цвет означает наличие на моделях зон с неприемлемым КЗМ (1-1,4), все остальные цвета соответствуют зонам моделей с референтным и больше него коэффициентом запаса прочности.

При анализе деформативно-напряженного состояния моделей из рассмотрения были исключены углы изделий, поскольку углы всегда являются концентраторами напряжений и учитывать их нет смысла, а следует ориентироваться на напряжение стенок.

Как можно увидеть из рис. 11, при минимальном давлении на модель А она имеет высокую прочность. Особенно прочной является основа изделия с почти четырехкратным запасом, и лишь незначительная зона, параллельная основе, в нижней части стенок имеет минимальный запас прочности. С ростом давления на модель площадь деформационных зон, имеющих неприемлемый КЗМ (менее 1,4), постепенно увеличивается. До давления 5 МПа наиболее напряженными являются нижние наружные части стенок. При давлении выше 5,5 МПа площадь деформационных зон увеличивается и по стенкам, причем сначала по их внешним поверхностям (5,5 МПа), а затем и по внутренним (6 – 7 МПа). Начиная с давления 6 МПа, появляются выраженные зоны деформации (КЗМ менее 1), которые сначала затрагивают стенки извне, а затем выходят на их внутреннюю часть. Это соответствует критическому состоянию модели и началу ее разрушения.

Примерно такой же является динамика изменения напряженно-деформированного состояния модели Б (рис. 12). Но обращает на себя внимание тот факт, что при относительно небольшом давлении у этой модели стенки более прочные, о чем свидетельствуют большие площади зон с относительно большим КЗМ. Например, при давлении 4 МПа у модели Б почти вся стенка имеет КЗМ в пределах 1,87 – 2,3 (с небольшими зонами, где КЗМ меньше 1,87), а в модели А – примерно 60 % площади стенок соответствует КЗМ 1,4 – 1,9. При давлении 5 МПа внешняя поверхность стенок обеих моделей характеризуется КЗМ 1,4 – 1,7, но внутренняя поверхность имеет более чем двойной запас прочности в модели Б. Дальнейшая нагрузка на модель Б влечет существенное увеличение площади деформационных зон с КЗМ менее 1,4, а ее критическое состояние наблюдается при давлении 5,8 МПа.



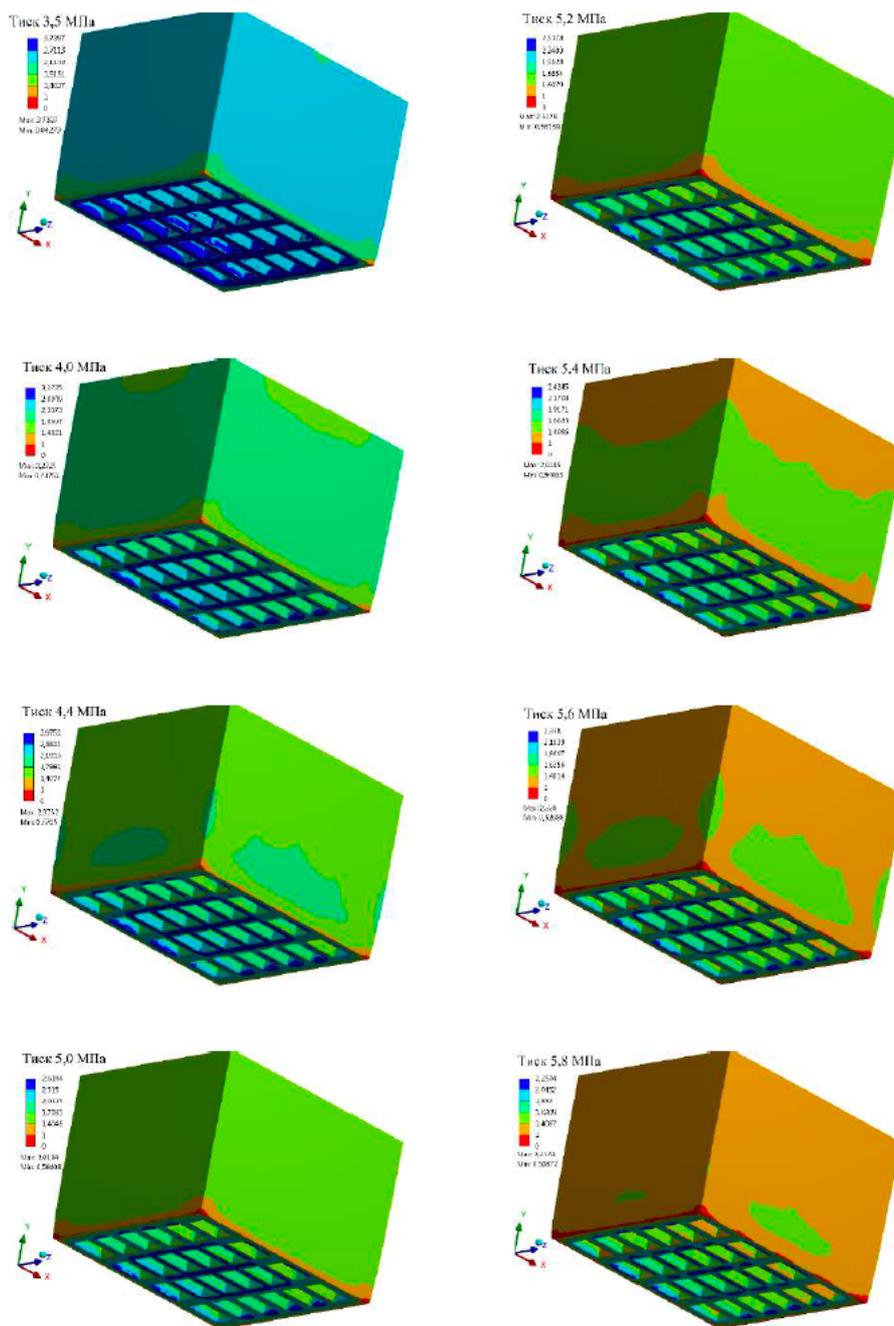


Рис. 12. 3D-модель Б, которая находится под действием различных нагрузок  
Fig. 12. 3D model B, which is under the influence of various loads

Такое различие деформационно-прочностных качеств моделей можно объяснить, основываясь на результатах исследования применительно к пористой и плотной технической керамике. Авторы показали, что разрушение плотных материалов происходит по механизму хрупкого разрушения с образованием магистральной микротрещины, а в пористых – подобно пластическим материалам с постепенным накоплением дефектов. При этом разрушающая нагрузка для плотных материалов гораздо больше, чем для пористых. Именно это наблюдается и для опытных моделей-критическая нагрузка для модели, а с плотной керамической стенкой составила 7 МПа, а для модели Б с пористой стенкой и меньшей пустотностью – 5,8 МПа.

Таким образом, анализ напряженно-деформированного состояния моделей и сопоставление их деформационно-прочностных качеств позволяют утверждать следующее. Повышение пористости керамической стенки приводит к деградации прочности изделия почти пропорционально уменьшению его пустотности. При переходе от модели, а с плотной керамической стенкой к модели Б с пористой стенкой и уменьшенной на 20% пустотностью значение разрушающей нагрузки уменьшилось на 18%. Динамика изменения напря-

женно-деформированного состояния модели с пористой керамической стенкой свидетельствует о предположительно отличительном характере ее разрушения по сравнению с моделью с плотной стенкой. Во второй модели, вероятно, образуются и накапливаются множественные очаги напряжений, вызванные наличием многочисленных границ раздела фаз «пора – керамика». Формирование зон наиболее вероятного разрушения моделей с неприемлемым коэффициентом запаса прочности происходит в плоскости, перпендикулярной оси приложения нагрузки, что характерно для керамических материалов с относительно небольшой прочностью.

Все вышесказанное приводит к выводу, что для улучшения деформационно-прочностных качеств изделий с пористой керамической стенкой необходимо разработать технологические приемы для укрепления собственно керамического материала и зон керамической матрицы, окружающих поры. Если прочность керамического материала находится в прямой зависимости от температуры обжига и вида глинистого сырья, то локальная прочность зон, граничащих с порами, – в первую очередь от формы пор. Поэтому следующий этап теоретических исследований был посвящен изучению влияния именно формы пор на прочностные характеристики керамической структуры с организованной пористостью.

КТКМ требуют обязательного согласования таких «антагонистических свойств, как низкая плотность и повышенная прочность. Обеспечение сбалансированного соотношения между этими свойствами при постоянной пустотности изделия становится возможным за счет организации благоприятной пористой структуры керамического материала, из которого изготавливается каркас изделия. В свою очередь, установление оптимальной структурной картины пористого керамического материала невозможно без определения влияния геометрии пор на его механические характеристики. Известны исследования относительно влияния формы пустот и пор на структурную прочность керамических материалов на макро- и макроуровне. Так, авторами работы на примере ячеистых бетонов, гипсовых изделий и керамических материалов теоретически и экспериментально доказано, что для повышения прочности пористого материала необходимо стремиться к созданию шаровой формы пор и пустот. Переход от кубической формы пустот к слойной позволяет увеличить прочность структуры в 1,5-3 раза в зависимости от плотности материала. При использовании пустотообразователей удлиненной формы вроде древесных опилок для повышения прочности необходимо стремиться к уменьшению относительной длины частиц. Авторы утверждают, что использование «коротких» пустотообразователей позволяет увеличить прочность материала в 2-3 раза.

При рассмотрении влияния пористости на прочность структуры керамического материала также ставится в зависимость прочность от формы ср. В любой форме пор ослабление механической прочности происходит по причине концентрации напряжений вокруг поры. Но величина этих напряжений зависит от формы пор. При наличии микроскопических сферических пор концентрация напряжений вокруг них по сравнению с окружающей матрицей материала увеличивается в два раза, для растянутой плоской поры – в пять и 10 раз, при сочетании двух сферических пор и капилляров между ними – в 20 раз. В тех же пропорциях уменьшается прочность материала. Делают акцент на факторе однородности структуры и обращают внимание, что чем меньше композиционная однородность материала, тем в большей степени можно ожидать ослабления его прочности.

Исходя из весомости фактора геометрии пор с точки зрения прочности материала, на данном этапе работы была поставлена задача исследовать деформативно-прочностные качества различных пористых керамических структур, которые можно получить с использованием наиболее распространенных поризаторов. Для решения этой задачи использовалась система автоматизированного проектирования и инженерного анализа SolidWorks Simulation, которая реализует метод конечных элементов. Программа позволяет создать имитационные компьютерные модели материалов и построить поля напряжений в материале при заданном уровне механической нагрузки на них.

Для расчетов в программе SolidWorks Simulation было создано три модели пористых керамических структур, которые содержат два структурных элемента: условно изотропный керамический материал и поры с воздухом. Модели отличались формой пор, которые закладывались сферические, эллипсоидные и глобулярные (сложнопрофильные) поры. Основные параметры моделей были установлены такими: общая пористость – 40% (умеренно пористая структура), расположение пор-хаотичное, примерно одинаковый размер пор. Для сферических пор диаметр ( $d$ ) составлял 0,07 – 0,1 мм, для эллипсоидных и глобулярных –  $d_1 = 0,07-0,1$  мм и  $d_2 = 0,28-0,4$  мм. Общий вид спроектированных моделей и их разбивка на конечно-элементные сетки показана на рис. 13. Условия нагружения моделей устанавливали отвечающими реальной нагрузке нескольких рядов изделий на один нижний ряд за равномерно распределенного давления. Нагрузка была одинаковой для всех трех моделей (рис. 14) и равнялась 10 МПа и 12,5 МПа. В табл. 1. приведены данные о физико-механических свойствах керамики как элемента модельной системы.

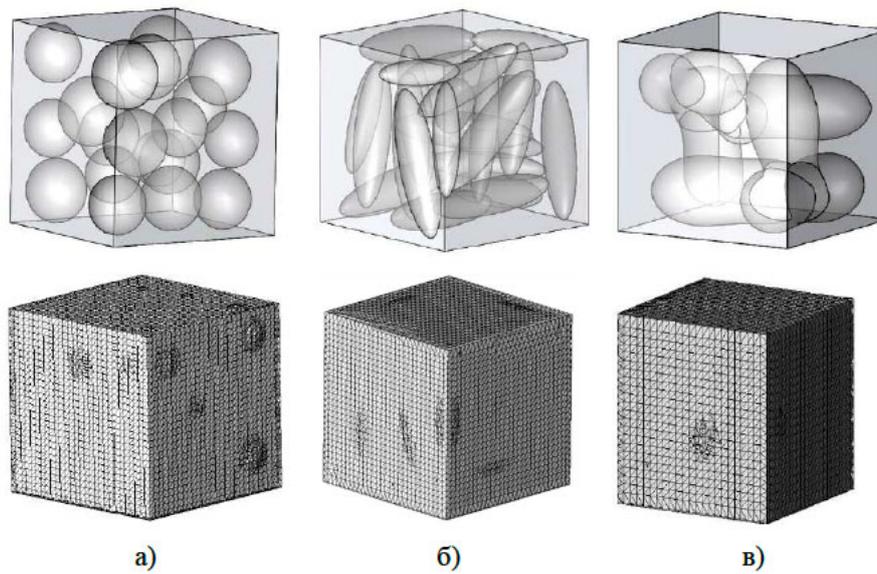


Рис. 13. Модели пористых керамических структур и их конечно-элементные сетки  
а) модель со сферическими порами; б) модель с эллипсоидными порами;  
в) модель с порами глобулярного типа

Fig. 13. Models of porous ceramic structures and their finite element meshes  
a) a model with spherical pores; b) a model with ellipsoid pores;  
c) a model with globular-type pores

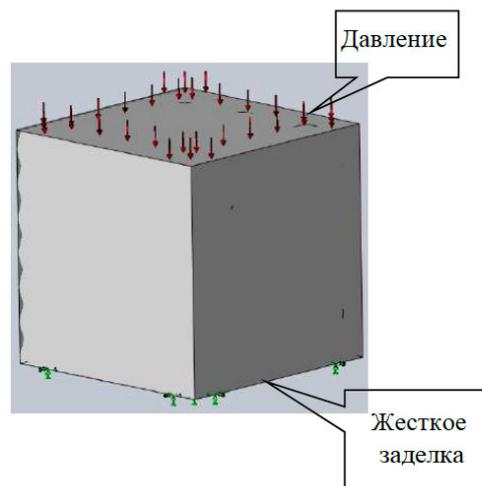


Рис. 14. Условия нагрузки моделей  
Fig. 14. Load conditions of models

**Физико-химические свойства керамики как элемента модельной системы,  
которые использовались в программе SolidWorks Simulation**

Таблица 1

**Physico-chemical properties of ceramics as an element of a modular system,  
which were used in the SolidWorks Simulation program**

Table 1

Свойства	Значение	Единицы измерения
Модуль упругости	3000	Н/м <sup>2</sup>
Коэффициент Пуассона	0,25	-
Модуль сдвига	12000000	Н/м <sup>2</sup>
Плотность	2600	кг/м <sup>3</sup>

Продолжение таблицы 1  
Continuation of Table 1

Предел прочности при растяжении	2000000	Н/м <sup>2</sup>
Предел прочности при сжатии	10000000	Н/м <sup>2</sup>
Предел текучести	0	Н/м <sup>2</sup>
Коэффициент теплового расширения	$5,5 \cdot 10^{-6}$	к <sup>-1</sup>
Теплопроводность	0,65	Вт/(м·К)
Удельная теплоемкость	840	Дж/(кг·К)

При расчетах в пакете SolidWorks Simulation использовался критерий разрушения материалов Писаренко-Лебедева  $\sigma_p$ , что является корректным для оценки прочности хрупких структурно неоднородных материалов, таких как керамика:

$$\sigma_p = \frac{0,41\sigma_k\sigma_c}{\sigma_c - 1,89\sigma_k} \sigma_k = \frac{P}{dt} \quad (10)$$

где  $\sigma_c$  – предел прочности при одноосном сжатии;

$\sigma_k$  – средняя по сечению прочность, обусловленная усилием P при диаметральной сжатии образца диаметром d и высотой t.

Данный критерий характеризует давление, отнесенное к объему образца, и представляет собой критическую нагрузку, которая вызывает разрушение структуры. Пористая керамическая структура будет разрушаться за счет возникновения макро- и микротрещин в своем объеме при достижении критической прочности. За критическую прочность было принято напряжение, отвечало выхода трещин на поверхность материала. Исходя из условий эксплуатации КТКМ, было принято, что критическая прочность материала будет составлять 10 МПа.

Результаты моделирования поведения пористых керамических структур под действием механической нагрузки приведены на рис. 15-17 в виде 3D моделей с эпюрами распределения напряжений. На этих рисунках цветом в красно-оранжевой части спектра выделены структурные зоны, в которых напряжения превышает критическую прочность 10 МПа (107 Н/м<sup>2</sup>). Справа от моделей показан объем их структуры, который будет разрушаться при превышении критической прочности, в табл. 2. – количественные значения этого объема, рассчитанные программой SolidWorks Simulation.

Таблица 2

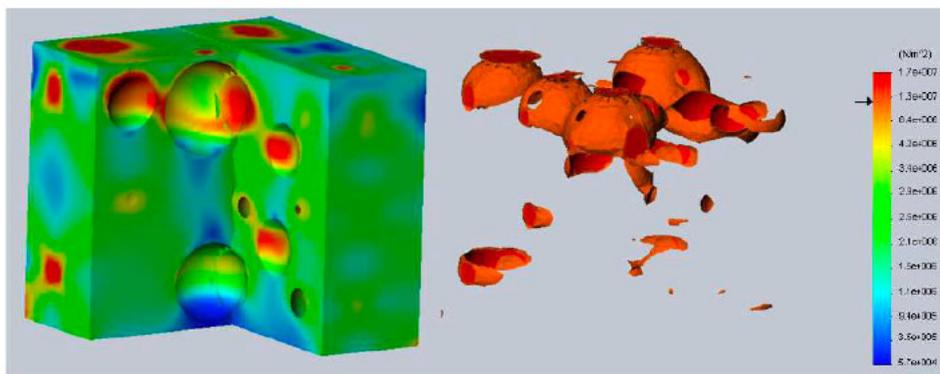
**Объем (%) структурных элементов 3D моделей, в которых напряжения превысили критическую прочность**

Table 2

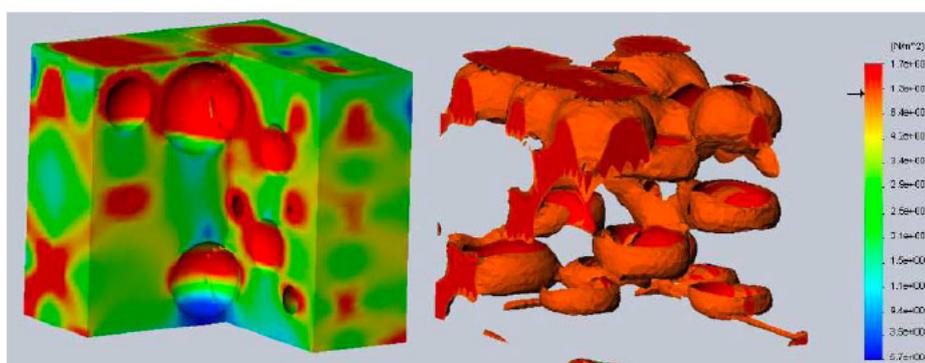
**Volume (%) of structural elements of 3D models in which stresses exceeded critical strength**

Вид пор	Нагрузка на модель	
	10 МПа	12,5 МПа
Сферические	6,01	24,53
Эллипсоидные	7,64	27,60
Глобулярные	7,49	27,16

Из рис. 15-17 можно увидеть, что с ростом нагрузки на модели (с 10 МПа до 12,5 МПа) в них возникает гораздо больше напряжений, которые соответствуют уровню критической прочности 10 МПа и модели существенно теряют свою прочность. Как свидетельствуют данные табл. 2, объем "разрушенных" элементов структуры при изменении давления с 10 МПа до 12,5 МПа увеличивается почти в четыре раза. При различной нагрузке на модели минимальный объем элементов структуры, в которых напряжения превысили критическую прочность, характерен для модели со сферическими порами. В такой модели объем разрушенных элементов структуры при нагрузке 10 МПа меньше в 1,25 раза, при нагрузке 12,5 МПа – в 1,13 раза. Менее прочными оказались структуры с эллипсоидными и глобулярными порами, но наименее прочной – структура с эллипсоидными порами, хотя уровень ее прочности схож с моделью, содержащей глобулярные поры. Это приводит к выводу, что при схожих геометрических размерах пор и одинаковом уровне пористости с точки зрения механических свойств более благоприятной структурой поризованной керамики является структура со сферическими порами, которая при различных нагрузках оказывается более прочной. При этом важно заметить, что согласно эпюрам распределения напряжений разрушение вероятнее всего будет происходить по стенкам пор, которые являются концентратором напряжений при любой форме пор.



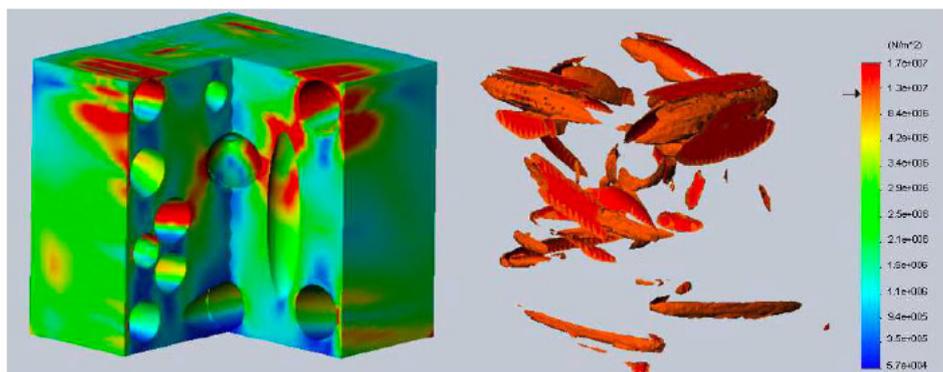
а)



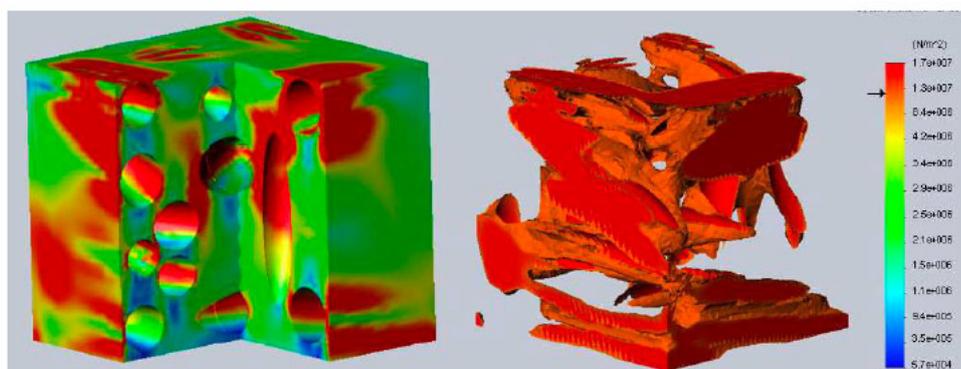
б)

Рис. 15. 3D модели керамической структуры со сферическими порами  
в напряженно-деформированном состоянии  
а) нагрузка 10 МПа; б) нагрузка 12,5 МПа

Fig. 15. 3D models of a ceramic structure with spherical pores in a stress-strain state  
a) load 10 MPa; b) load 12.5 MPa



а)



б)

Рис. 16. 3D модели керамической структуры с эллипсоидными порами  
в напряженно-деформированном состоянии  
а) нагрузка 10 МПа; б) нагрузка 12,5 МПа

Fig. 16. 3D models of a ceramic structure with ellipsoid spores in a stress-strain state  
a) a load of 10 MPa; b) a load of 12.5 MPa

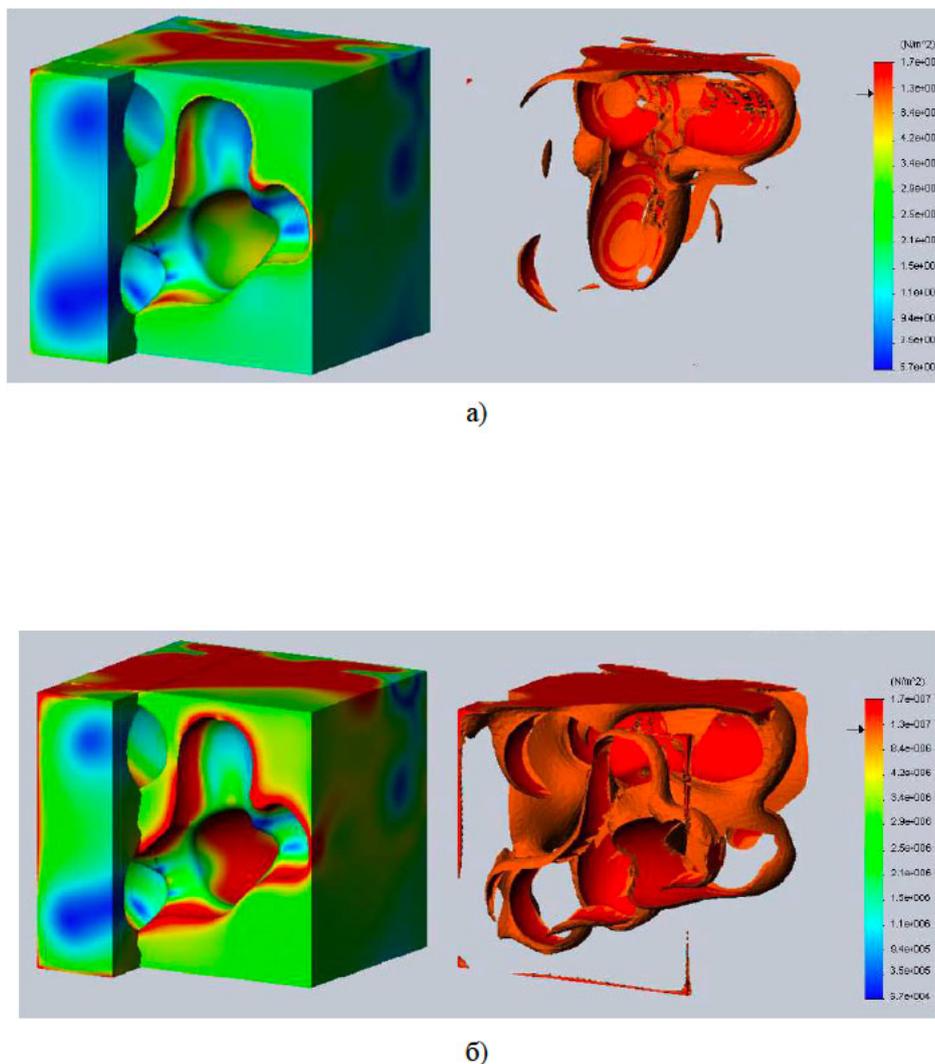


Рис. 17. 3D модели керамической структуры с глобулярными порами  
в напряженно-деформированном состоянии  
а) нагрузка 10 МПа; б) нагрузка 12,5 МПа

Fig. 17. 3D models of a ceramic structure with globular pores in a stress-strain state  
a) a load of 10 MPa; b) a load of 12.5 MPa

Таким образом, результаты 3D-моделирования напряженно-деформированного состояния керамических структур с различной геометрией пор позволяют сделать такой вывод. При разработке поризованной КТБК следует создавать в материале максимальное количество пор сферической формы при меньшем количестве глобулярных и исключить возможность образования пор эллипсоидного типа. Образование последних пор увеличивает вероятность разрушения структуры в 1,25 раза по сравнению с материалами со сферической формой пор при одинаковых условиях нагрузки. Организация сферических и глобулярных пор с преобладанием сферических возможна при использовании поризаторов, способных обеспечить именно такую структурную картину.

#### Выводы

Анализ информации относительно трендов совершенствования геометрических параметров современной КТБК, а также взаимосвязи «пустотность – теплопроводность» показал, что в условиях отечественного сырьево-ресурсного потенциала снижения тепло-проводимости целесообразно достигать путем организации пористой структуры керамического каркаса изделия при его уменьшенной пустотности. По результатам расчетов эквивалентных коэффициентов теплопроводности двух моделей керамических изделий с различной пустотностью (40% и 60%), которые имеют поризованную и плотную стенку, установлено, что уменьшение пустотности на 20% при условии пористой керамической стенки улучшает теплозащитные

свойства модели, уменьшая коэффициент теплопроводности на 12%. Сделан вывод, что с точки зрения теплопроводности при одинаковой геометрии пустот рациональной конструкцией изделия является модель с поризованным керамическим каркасом и меньшей пустотностью.

Проведенная теоретическая оценка деформативно-прочностных качеств вышеозначенных моделей на основе анализа их напряженно-деформированного состояния под различной силовой нагрузкой с использованием компьютерно-имитационного 3D-моделирования. Установлено, что увеличение пористости керамической стенки приводит к деградации прочности изделия, что указывает на необходимость разработки технологических приемов по укреплению поризованного материала.

Осуществлено теоретическое обоснование рациональной пористой структуры керамического материала для повышения его механической прочности на основе анализа напряженно-деформированного состояния модельных керамических структур с разной геометрией пор. С использованием компьютерного 3D моделирования построены модели пористых структур со сферическими, эллипсоидными и глобулярными порами, которые имитируют структуры, получаемые с использованием наиболее распространенных поризаторов. Установлено, что при схожих геометрических размерах пор и одинаковом уровне общей пористости оптимальной является структурная модель со сферическими порами, которая при различных нагрузках является более прочной по сравнению с другими. В соответствии с эпорами распределения напряжений разрушения материалов в первую очередь происходит по стенкам пор, является концентратором напряжений при любой их форме.

Проведены теоретические исследования в комплексе позволили определить технологические принципы создания современной КТБК и направления формирования рациональной пористой структуры материалов. Они в основном заключаются в следующем:

- для улучшения теплозащитных свойств изделий и их большей технологичности за оптимальную модель конструкции следует принять модель с меньшей пустотностью и поризованным керамическим каркасом;
- для организации наиболее благоприятной структурной картины поризованного материала и увеличения его механической прочности следует создавать в нем максимальное количество пор сферической формы с подчиненной количества глобулярных и минимизировать возможность образования пор эллипсоидного типа;
- для улучшения деформативно-прочностных качеств изделий с пористой керамической стенкой необходимо укреплять как собственно керамический материал (межпоровые перегородки), так и локальные зоны керамической матрицы, окружающие поры, как наиболее уязвимый цепь структуры поризованной керамики.

### Литература

1. Afroz S., Navimipour N.J. Afroz S. An effective nano design of demultiplexer architecture based on coplanar quantum-dot cellular automata // IET Circuits, Devices and Systems. 2021. Vol. 15. № 2. P. 168 – 174.
2. Almatrood A., George A.K., Singh H. Low-power multiplexer structures targeting efficient qca nanotechnology circuit designs // Electronics (Switzerland). 2021. Vol. 10. № 16.
3. Averyanov D.V., Liu P., Sokolov I.S. Nanoscale synthesis of ionic analogues of bilayer silicene with high carrier mobility // Journal of Materials Chemistry C. 2021. Vol. 9. № 27. P. 8545 – 8551.
4. Bellucci L., Delfino F., Tozzini V. In silico design, building and gas adsorption of nano-porous graphene scaffolds // Nanotechnology. 2021. Vol. 32. № 4.
5. Cortés-Arriagada D., Miranda-Rojas S., Cid-Mora F., Toro-Labbé A. First-principles study of hybrid nanostructures formed by deposited phthalocyanine/porphyrin metal complexes on phosphorene // Journal of Molecular Liquids. 2021. Vol. 333.
6. Enayati M., Rezaei A., Karimi A. Efficient circuit design for content-addressable memory in quantum-dot cellular automata technology // SN Applied Sciences. 2021. Vol. 3. № 10.
7. Hochrein L.M., Li H., Pierce N.A. High-Performance Allosteric Conditional Guide RNAs for Mammalian Cell-Selective Regulation of CRISPR/Cas // ACS Synthetic Biology. 2021. Vol. 10. № 5. P. 964 – 971.
8. Lacroix A., Sleiman H. F. DNA Nanostructures: Current Challenges and Opportunities for Cellular Delivery // ACS Nano. 2021. Vol. 15. № 3. P. 3631 – 3645.
9. Li Q., Li J., Yu W. De novo design of a pH-triggered self-assembled  $\beta$ -hairpin nanopeptide with the dual biological functions for antibacterial and entrapment // Journal of Nanobiotechnology. 2021. Vol. 19. № 1.
10. Misra R., Rudnick-Glick S., Adler-Abramovich L. From Folding to Assembly: Functional Supramolecular Architectures of Peptides Comprised of Non-Canonical Amino Acids // Macromolecular Bioscience. 2021. Vol. 21. № 8.

11. Pei Y., Wang L., Tang K., Kaplan D. L. Biopolymer Nanoscale Assemblies as Building Blocks for New Materials: A Review // *Advanced Functional Materials*. 2021. Vol. 31. № 15.
12. Penth M., Schellnhuber K., Bennowitz R., Blass J. Nanomechanics of self-assembled DNA building blocks // *Nanoscale*. 2021. Vol. 13. № 20. P. 9371 – 9380.
13. Qian X., Nymann Westensee I., Brodskij E., Städler B. Cell mimicry as a bottom-up strategy for hierarchical engineering of nature-inspired entities // *Wiley Interdisciplinary Reviews: Nanomedicine and Nanobiotechnology*. 2021. Vol. 13. № 3.
14. Rahali A., Shaukat A., Almeida-Marrero V.A Janus-Type Phthalocyanine for the Assembly of Photoactive DNA Origami Coatings // *Bioconjugate Chemistry*. 2021. Vol. 32. № 6. P. 1123 – 1129.
15. Sproncken C.C.M., Magana J.R., Voets I.K. 100th Anniversary of Macromolecular Science Viewpoint: Attractive Soft Matter: Association Kinetics, Dynamics, and Pathway Complexity in Electrostatically Coassembled Micelles // *ACS Macro Letters*. 2021. Vol. 10. № 2. P. 167 – 179.
16. Sun Q., Zhou G., Meng Z. An integrated computational materials engineering framework to analyze the failure behaviors of carbon fiber reinforced polymer composites for lightweight vehicle applications // *Composites Science and Technology*. 2021. Vol. 202.
17. Vikulina A.S., Campbell J. Biopolymer-based multilayer capsules and beads made via templating: Advantages, hurdles and perspectives // *Nanomaterials*. 2021. Vol. 11. № 10.
18. Wang J., Li Z., Gu Z. A comprehensive review of template-synthesized multi-component nanowires: From interfacial design to sensing and actuation applications // *Sensors and Actuators Reports*. 2021. Vol. 3.
19. Ye J., Aftenieva O., Bayrak T. Complex Metal Nanostructures with Programmable Shapes from Simple DNA Building Blocks // *Advanced Materials*. 2021. Vol. 33. № 29.
20. Zhang J., Zhang H., Wang H. Performance prediction of nanoscale thermal cloak by molecular dynamics // *Applied Physics A: Materials Science and Processing*. 2021. Vol. 127. № 10.

### References

1. Afrooz S., Navimipour N.J. Afrooz S. An effective nano design of demultiplexer architecture based on coplanar quantum-dot cellular automata. *IET Circuits, Devices and Systems*. 2021. 15 (2). P. 168 – 174.
2. Almatrood A., George A.K., Singh H. Low-power multiplexer structures targeting efficient qca nanotechnology circuit designs. *Electronics (Switzerland)*. 2021. 10. № 16.
3. Averyanov D.V., Liu P., Sokolov I.S. Nanoscale synthesis of ionic analogues of bilayer silicene with high carrier mobility. *Journal of Materials Chemistry C*. 2021. 9 (27). P. 8545 – 8551.
4. Bellucci L., Delfino F., Tozzini V. In silico design, building and gas adsorption of nano-porous graphene scaffolds. *Nanotechnology*. 2021. 32 (4).
5. Cortés-Arriagada D., Miranda-Rojas S., Cid-Mora F., Toro-Labbé A. First-principles study of hybrid nanostructures formed by deposited phthalocyanine/porphyrin metal complexes on phosphorene. *Journal of Molecular Liquids*. 2021. 333.
6. Enayati M., Rezai A., Karimi A. Efficient circuit design for content-addressable memory in quantum-dot cellular automata technology. *SN Applied Sciences*. 2021. 3 (10).
7. Hochrein L.M., Li H., Pierce N.A. High-Performance Allosteric Conditional Guide RNAs for Mammalian Cell-Selective Regulation of CRISPR/Cas. *ACS Synthetic Biology*. 2021. 10 (5). P. 964 – 971.
8. Lacroix A., Sleiman H. F. DNA Nanostructures: Current Challenges and Opportunities for Cellular Delivery. *ACS Nano*. 2021. 15 (3). P. 3631 – 3645.
9. Li Q., Li J., Yu W. De novo design of a pH-triggered self-assembled  $\beta$ -hairpin nanopeptide with the dual biological functions for antibacterial and entrapment. *Journal of Nanobiotechnology*. 2021. 19 (1).
10. Misra R., Rudnick-Glick S., Adler-Abramovich L. From Folding to Assembly: Functional Supramolecular Architectures of Peptides Comprised of Non-Canonical Amino Acids. *Macromolecular Bioscience*. 2021. 21 (8).
11. Pei Y., Wang L., Tang K., Kaplan D. L. Biopolymer Nanoscale Assemblies as Building Blocks for New Materials: A Review. *Advanced Functional Materials*. 2021. 31 (15).
12. Penth M., Schellnhuber K., Bennowitz R., Blass J. Nanomechanics of self-assembled DNA building blocks. *Nanoscale*. 2021. 13 (20). P. 9371 – 9380.
13. Qian X., Nymann Westensee I., Brodskij E., Städler B. Cell mimicry as a bottomup strategy for hierarchical engineering of nature-inspired entities. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Nanomedicine and Nanobiotechnology*. 2021. 13 (3).
14. Rahali A., Shaukat A., Almeida-Marrero V.A Janus-Type Phthalocyanine for the Assembly of Photoactive DNA Origami Coatings. *Bioconjugate Chemistry*. 2021. 32 (6). P. 1123 – 1129.

15. Sproncken C.C.M., Magana J.R., Voets I.K. 100th Anniversary of Macromolecular Science Viewpoint: Attractive Soft Matter: Association Kinetics, Dynamics, and Pathway Complexity in Electrostatically Coassembled Micelles. *ACS Macro Letters*. 2021. 10 (2). P. 167 – 179.
16. Sun Q., Zhou G., Meng Z. An integrated computational materials engineering framework to analyze the failure behaviors of carbon fiber reinforced polymer composites for lightweight vehicle applications. *Composites Science and Technology*. 2021. 202.
17. Vikulina A.S., Campbell J. Biopolymer-based multilayer capsules and beads made via templating: Advantages, hurdles and perspectives. *Nanomaterials*. 2021. 11 (10).
18. Wang J., Li Z., Gu Z. A comprehensive review of template-synthesized multi-component nanowires: From interfacial design to sensing and actuation applications. *Sensors and Actuators Reports*. 2021. 3.
19. Ye J., Aftenieva O., Bayrak T. Complex Metal Nanostructures with Programmable Shapes from Simple DNA Building Blocks. *Advanced Materials*. 2021. 33 (29).
20. Zhang J., Zhang H., Wang H. Performance prediction of nanoscale thermal cloak by molecular dynamics. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*. 2021. 127 (10).

*Zhuikov S.V.,\* Project Architect,  
South Ural State University, Russia*

\*Corresponding author E-mail: renderwork74@gmail.com

## THE USE OF NANOTECHNOLOGY FOR THE DESIGN OF BUILDING STRUCTURES

**Abstract:** Russia has a developed industry of building materials, which today implements an energy- and resource-saving model of its development. The implementation of the state policy of resource conservation is carried out in two main directions: the first direction is to save resources in the production of materials, the second is to increase the production of energy-efficient materials that allow saving energy carriers during their operation. Modern construction in Russia is guided by European construction standards, which, in turn, provides for the construction of energy-saving buildings with minimal energy consumption from external sources. This is ensured by the use of structural and thermal insulation materials in the construction of external walls. In modern structural and thermal insulation materials for energy-saving construction, high requirements are imposed on their thermal properties, mechanical strength and comfort level. From the point of view of simultaneous satisfaction of these requirements, ceramic materials have obvious advantages over other materials, in particular cellular concretes, which, with almost the same level of thermal conductivity, are characterized by the least hygroscopicity and significantly greater strength. An objective prospect for the development of structural and thermal insulation ceramics is the production of hollow ceramic stones with increased thermal efficiency for their use in economical single-layer external wall structures without additional insulation. The products of individual Ukrainian manufacturers and even imported analogues of the most famous European manufacturer (Wienerberger Company, Austria), when used in single-layer walls, do not provide regulatory requirements for the heat transfer resistance of masonry for the first temperature zone of Russia, which occupies the majority of the territory (60%). This requires the improvement of domestic products in the direction of improving their thermal characteristics (reducing thermal conductivity and increasing thermal resistance).

**Keywords:** nanotechnology, design, construction concrete, climate zone

**Для цитирования:** Жуйков С.В. Использование нанотехнологий для проектирования строительных конструкций // Строительные материалы и изделия. 2021. Том 4. № 6. С. 26 – 47. DOI: 10.34031/2618-7183-2021-4-6-26-47

**For citation:** Zhuikov S.V. The use of nanotechnology for the design of building structures. *Construction Materials and Products*. 2021. 4 (6). P. 26 – 47. DOI: 10.34031/2618-7183-2021-4-6-26-47

*Поступила в редакцию 29 августа 2021 г.*

*Принята в доработанном виде 30 сентября 2021 г.*

*Одобрена для публикации 18 ноября 2021 г.*

*Received: August 29, 2021.*

*Revised: September 30, 2021.*

*Accepted: November 18, 2021.*