

УДК 004.942

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КЛАДКИ ИЗ ГАЗОБЕТОННЫХ БЛОКОВ, УСИЛЕННОЙ КОМПОЗИТНЫМИ ПОЛИМЕРНЫМИ СЕТКАМИ

Васильев М.В.¹, Белавский В.А.², Ткаченко О.Я.³

ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им В.И. Вернадского»,
Институт «Академия строительства и архитектуры»,
295493, Республика Крым, г. Симферополь, улица Киевская, 181,
¹wmv_sapr@mail.ru, ²belavsky@mail.ru, ³krabeklac@gmail.com

Аннотация. В статье представлены подходы к моделированию каменной кладки из ячеистых бетонов с армированием композитными сетками. Локальные численные модели были верифицированы при помощи данных физических экспериментов. При помощи пространственных моделей выполнена оценка влияния на несущую способность усиления кладки при помощи композитных полимерных сеток.

Предмет исследования: напряженно-деформированное состояние численных моделей зданий из кладки из ячеистых бетонов.

Материалы и методы: исследования выполнены на базе численных моделей в программном комплексе «ЛИРА-САПР» методом конечных элементов в физически нелинейной постановке.

Результаты: при помощи локальных моделей были определены нелинейные характеристики, позволяющие достоверно моделировать кладку из ячеистых бетонов. Далее при помощи пространственных моделей выполнена оценка влияния наличия, вида и степени армирования кладки из ячеистых бетонов композитными полимерными сетками.

Выводы: кладка из ячеистых бетонов является материалом, позволяющим получить энергоэффективное здание. Армирование кладки при помощи композитных полимерных сеток позволяет существенно повысить сейсмостойкость несущей системы здания.

Ключевые слова: ячеистый бетон, каменная кладка, сейсмическое воздействие, прочность кладки из легких бетонов, моделирование кладки.

ВВЕДЕНИЕ

Данное исследование расширяет границы применения одного из самых перспективных и востребованных материалов – ячеистых бетонов (в том числе автоклавных газобетонов). В работе рассматриваются возможные пути снижения энергоемкости строительной отрасли за счет снижения расхода энергии и материалов на протяжении всего жизненного цикла здания. Так же рассмотрены и уточнены методики моделирования и прочностных расчетов каменных зданий при сейсмическом воздействии. Для Крымского региона, как одного из сейсмически опасных регионов Российской Федерации, исследование имеет особое значение, т.к. применение её результатов позволяет повысить плотность застройки, а так же более эффективно моделировать и рассчитывать каменные здания на сейсмические воздействия.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Микроклимат помещений, в которых гражданское население проводит от 70 до 90% времени, обладает рядом нормируемых параметров, обуславливающих комфортность пребывания внутри помещения, таких как: влажность, освещенность, температура, скорость движения воздуха [1] и пр. Первостепенной целью, данного стандарта является обеспечение оптимальных показателей микроклимата в помещениях: «сочетания значений показателей микроклимата,

которые при длительном и систематическом воздействии на человека обеспечивают нормальное тепловое состояние организма при минимальном напряжении механизмов терморегуляции...». Поддержание параметров микроклимата в пределах оптимальных сопряжено со значительными затратами, как на стадии проектирования, так и на стадиях возведения и эксплуатации объектов строительства.

Существуют два основных метода поддержания заданного микроклимата внутри здания. На первоначальном этапе становления строительной отрасли в России (тогда в СССР) шли по пути увеличенного расхода энергоносителей, с целью выделения необходимого количества тепловой и электрической энергии; тепловая защита зданий не играла первостепенной роли. Приоритет был смещен в сторону уменьшения расхода строительных материалов, снижения трудоёмкости [2]. Это позволяло избежать удорожания строительства и сократить расход ресурсов на возведение, за счет отказа от применения большого количества теплоизолирующих и конструкционных материалов, однако существенно увеличивало расход невозобновляемых природных ресурсов. Такая тенденция снижения материалоемкости строительства наблюдалась в России в двадцатом столетии: «Так за период с 1911 по 1980 г. средняя материалоемкость наружных стен каменных зданий в Санкт-Петербурге снизилась от полутора до восьми раз: с 1206 кг/м² (2 ½ полнотелых кирпича) до 150–400 кг/м² (серии 600.11 и 504) для панельных

зданий и 728 кг/м² (2 щелевых кирпича) для кирпичных» [2].

Со временем, в России, как и в большинстве стран, все большее значение стало приобретать сокращение расходов энергоносителей [2]. Для второго направления поддержания заданных параметров микроклимата, характерны вложения ресурсов и повышение трудоёмкости объекта на стадии строительства, с целью сокращения расходов на эксплуатацию. Особое внимание стало уделяться снижению расходов на отопление.

Эта тенденция сформировалась в 70 гг. XX в. Предпосылка для её формирования стали энергетический кризис 1973 года, развитие индустрии теплоизоляционных материалов, рост тарифов и ужесточение норм. Её формирование можно отчетливо проследить в нормативных документах и законодательных актах. Вступление в силу СНиП II-A.7-71 [3] стало новым шагом в развитии энергосберегающего строительства: появляется необходимость в обосновании выбора сопротивления теплоотдаче стен.

Из данных представленных в работе [4] следует, что в период с 1979 приоритетом строительной отрасли в области энергосбережения становится «Минимизация затрат на возведение и эксплуатацию зданий». А с 2003 года по настоящее время целью является минимизация расхода на отопление.

Потенциально, одним из путей увеличения термического сопротивления стен без отягощения отрасли энергоёмкими процессами производства и монтажа систем утепления, является использование однослойных несущих конструкций из газобетона. Сам по себе газобетон является несущим слоем конструкции, обеспечивающим помимо несущей способности так же необходимые теплотехнические свойства: сопротивление теплопередаче конструкции. При этом газобетонные стены не требуют дополнительных затрат на утепление, следовательно, снимается целый ряд энергоёмких задач связанных с производством теплоизоляционных материалов и монтажом многослойных конструкций на их основе.

Действующие нормы не всегда успевают учитывать развитие отрасли строительных материалов. В качестве примера можно привести ограничение в плотности для газобетонов, используемых в сейсмических районах. Ранее газобетон пониженной плотности не обеспечивал требуемой прочности. На сегодняшний день на рынке представлены образцы газобетонов классом плотности D500, обладающие требуемой прочностью на сжатие [5]. Применение стенового материала пониженной плотности могло бы снизить инерциальные силы, что положительно сказалось бы на работе такого здания под сейсмическим воздействием. Однако, согласно действующим нормам, применение этого материала для возведения несущих стен недопустимо.

Еще одним аспектом развития строительной отрасли остаётся широкое применение в расчетах

программных комплексов, таких как ПК «Лира», «SCAD», «Ansys», «Robot» и прочие. Их использование позволяет исследователям разрабатывать и внедрять методики определения усилий в каменной кладке различной степени точности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Применяемые во время исследования методики: теоретический анализ, численное моделирование, статистический анализ.

Структурно исследование можно разделить на составные части:

- 1) исследование на локальных моделях образцов кладки из различных материалов;
- 2) эксперименты на пространственных моделях зданий.

В первой части исследований была получена закономерность, отражающая взаимосвязь между прочностными характеристиками кладочных материалов и характеристиками интегрального конечного элемента численной модели кладки.

Каменная кладка, как основа несущей конструкции, - комбинация кладочных материалов (камня и раствора). Каждый из материалов кладки имеет свой физически нелинейный закон зависимости напряжений от деформаций. В случае моделирования каменной кладки методом конечных элементов «как есть» (с соблюдением геометрических и физических параметров камней и швов (т.н. дифференциальная модель)), возникает ряд определенных трудностей. Она сопряжена, в первую очередь с неоправданно высокой трудоёмкостью такого моделирования, а так же с недостаточной вычислительной мощностью компьютеров: потребовалось бы разбивать модель всего здания на конечные элементы с шагом несколько мм, при этом моделирование каждого камня и шва пришлось бы осуществлять вручную. Ключ к решению данной проблемы - интегральный конечный элемент, в который заложена закономерность работы кладки как анизотропного, но единого материала.

Во второй части исследований были проведены численные эксперименты с пространственными моделями зданий. Были заданы три типа конфигурации (этажность, размеры элементов несущей системы) каждый из которых соответствует минимальным требованиям норм по сейсмостойкому строительству при нагрузке отвечающей 7-ми, 8-ми и 9-ти баллам сейсмического воздействия по [6].

Модели зданий для опытов имеют такую конфигурацию, при которой размеры простенков минимальны, а планировка имеет простую и регулярную структуру. Это упростило анализ результатов.

Конструкцию стен подбирали из условия обеспечения заданных теплотехнических характеристик. Толщина стен из газобетона

назначена так, что бы заданные теплотехнические требования были обеспечены без использования дополнительного утеплителя.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

В первой части исследований было выполнено моделирование:

1. минерального клея при работе на растяжение и сжатие;
2. ячеистого бетона при работе на сжатие;
3. работы образца кладки на срез по неперевязанному шву.

При моделировании использовали опубликованные результаты физических экспериментов [5, 7]. Рассмотренные образцы представлены на рис. 1.

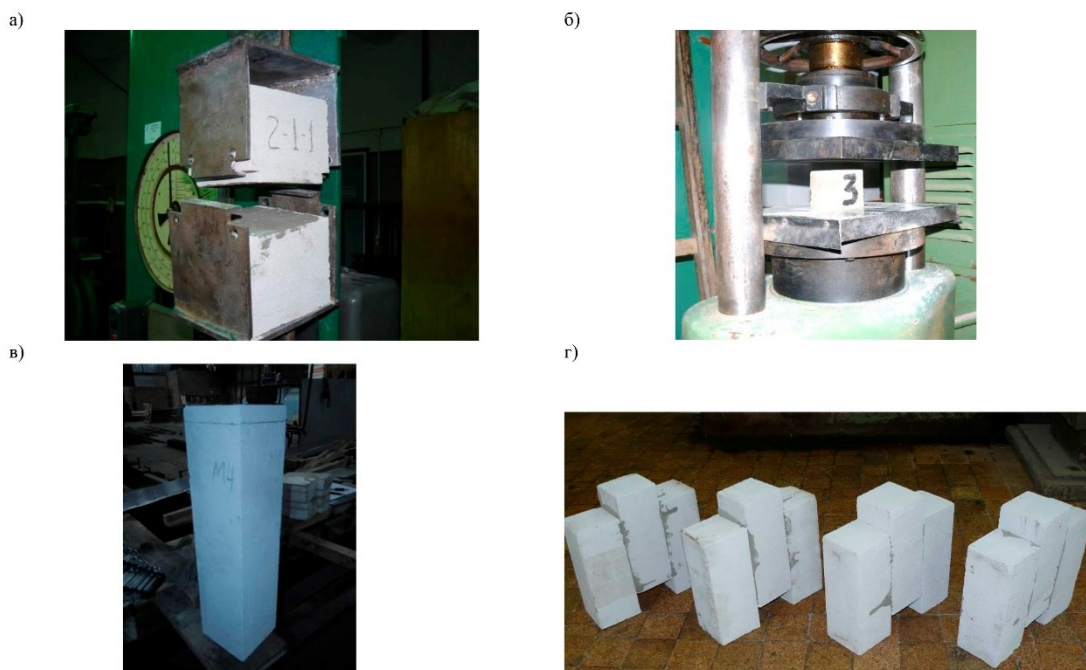


Рис. 1. Общий вид рассмотренных физических образцов:

- а) испытание раствора на растяжение; б) испытание раствора на сжатие; в) испытание камня на сжатие; г) испытание кладки на срез
- Fig. 1.** General view of the physical samples examined: a) tensile test of mortar; b) compression test of mortar; c) compression test of ashlar; d) shear test of masonry

По результатам анализа исходных данных и результатов физических экспериментов были сформированы исходные данные для численного моделирования: сведения о материалах,

геометрических размерах образцов, характере и величине загрузки.

Численный эксперимент проводим путём формирования конечноэлементной модели физического прототипа (рис. 2).

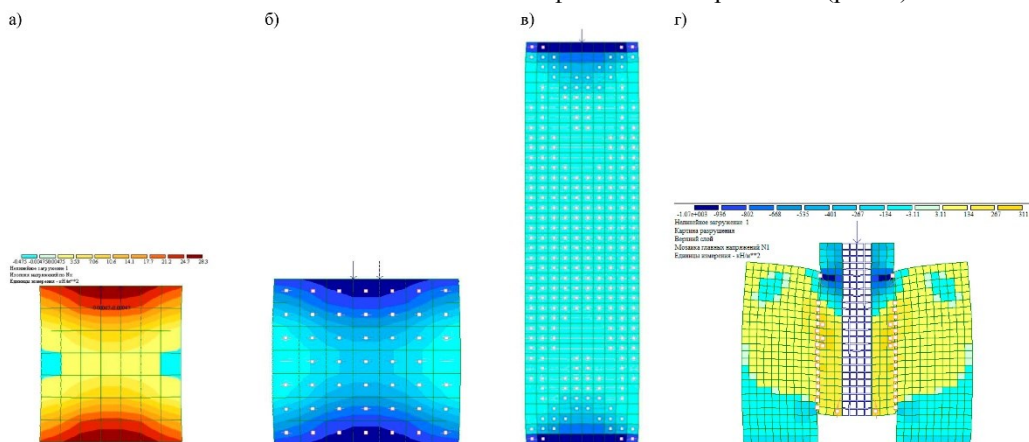


Рис. 2. Общий вид рассмотренных численных моделей:

- а) испытание раствора на растяжение; б) испытание раствора на сжатие; в) испытание камня на сжатие; г) испытание кладки на срез
- Fig. 2.** General view of the considered numerical models: a) tensile test of mortar; b) compression test of mortar; c) compression test of ashlar; d) shear test of masonry

В качестве результатов анализировали напряженно-деформированное состояние рассмотренных численных моделей и характер разрушения. Характер и значения графиков, полученных экспериментальным путём и методом

численного моделирования, согласуются (рис. 3). Нелинейные свойства кладки смоделированы корректно и пригодны для создания пространственных моделей несущей системы здания.

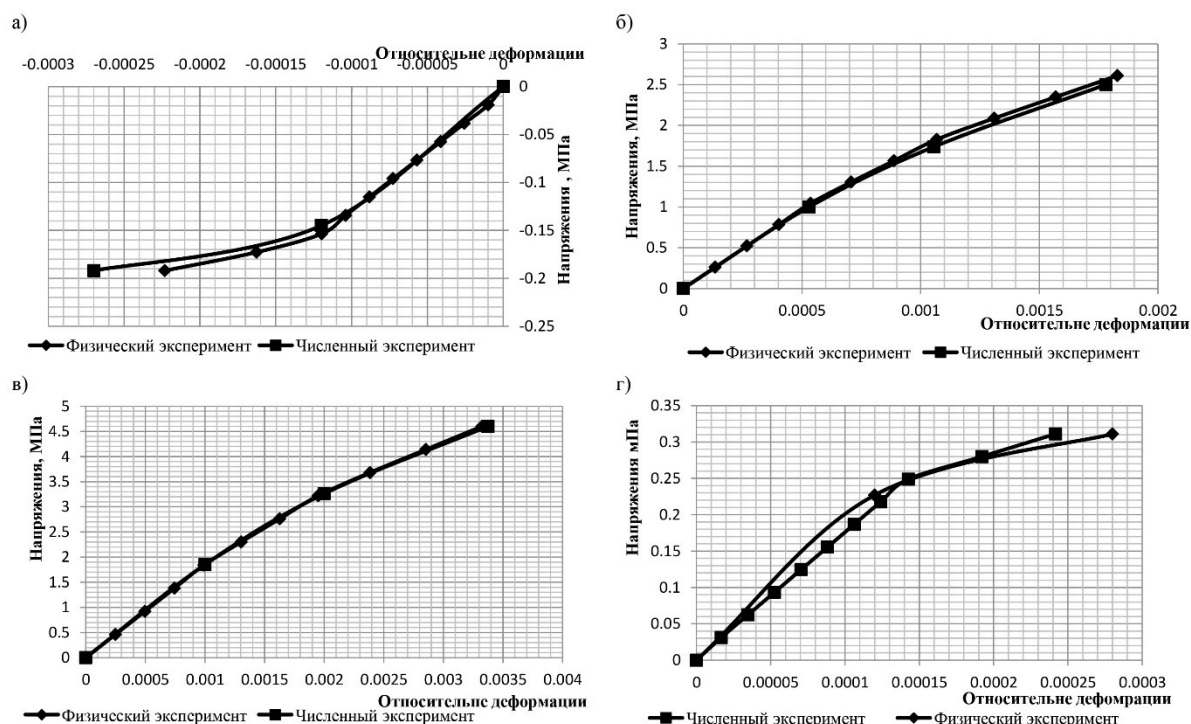


Рис. 3. Сопоставление результатов физических экспериментов и численного моделирования:

а) испытание раствора на растяжение; б) испытание раствора на сжатие; в) испытание камня на сжатие; г) испытание кладки на срез

Fig. 3. Comparison of results between physical experiments and numerical modeling:

а) tensile test of mortar; б) compression test of mortar; в) compression test of ashlar; г) shear test of masonry

Таблица 1. Результаты определения разрушающей нагрузки от сейсмического воздействия при различных вариантах армирования кладки композитными сетками

Table 1. Results of determining the destructive load from seismic impact for different options of reinforcing masonry with composite meshes

№	Интенсивность сейсмического воздействия, баллы	Армирование	Коэффициент к сейсмической нагрузке при разрушении
1.	7	нет	1,9
2.	7	Композитная сетка 0,041% (горизонт)	2,2
3.	7	Композитная сетка 0,25% (горизонт)	3,2
4.	7	Композитная сетка 1% (горизонт)	3,4
5.	7	Композитная сетка вертикаль.0,041%+горизонт.0,041%	4,1
6.	8	нет	1,1
7.	8	Композитная сетка 0,057% (горизонт)	1,1
8.	8	Композитная сетка 0,25% (горизонт)	1,6
9.	8	Композитная сетка 1% (горизонт)	2
10.	8	Композитная сетка вертикаль.0,057%+ горизонт.0,057%	1,9
11.	9	нет	0,7
12.	9	Композитная сетка 0,057% (горизонт)	0,5
13.	9	Композитная сетка 0,25% (горизонт)	0,9
14.	9	Композитная сетка 1% (горизонт)	1
15.	9	Композитная сетка вертикаль.0,057%+ горизонт.0,057%	1,1

Дальнейшие исследования проводили на пространственных моделях. Были заданы три типа конфигурации (этажность, размеры элементов несущей системы) каждый из которых соответствует минимальным требованиям норм по сейсмостойкому строительству при нагрузке отвечающей 7-ми, 8-ми и 9-ти баллам сейсмического воздействия по [6]. Принимаем следующие параметры и их значения: высота этажа: 3 м (как наиболее распространенное значение в жилищном строительстве); количество этажей: 1 этаж для сейсмичности 9 баллов и 2 этажа для 7 и 8 баллов (согласно п.9, табл. 6.1 [6]); расстояние между осями поперечных стен здания: 9 м (согласно п. 6.14.9 [6]). Изначально задавшись количеством окон, а так же расстоянием между продольными и поперечными осями стен, размеры простенков принимаем минимальными в соответствии с таблицей 6.2. [6]. По результатам теплотехнического расчета в соответствии с требованиями [8] назначаем толщину стены из газобетона равную 350 мм. Она соответствует условиям г. Симферополь.

Загружение модели формируем при помощи шагового процессора. Все статические нагрузки (постоянные, длительные, временные) совмещаем в одном нагружении с соответствующими сейсмическими коэффициентами. Сейсмическую нагрузку формируем как статическое нагружение: суммарную нагрузку для каждого этажа и распределяем равномерно между всеми узлами в уровне перекрытия данного этажа.

В качестве результата фиксируем коэффициент к сейсмическому нагружению, при котором диагностируется разрушение модели (табл. 1).

ВЫВОДЫ

1. Применение однослойных несущих конструкций из газобетона в потенциале способно снизить энергоемкость строительной отрасли на всех стадиях жизненного цикла объектов строительства и обеспечить требуемые теплотехнические характеристики возводимых и реконструируемых зданий.

2. Комбинированные конструкции из ячеистых бетонов с использованием армирования композитными полимерными сетками - существенный ресурс увеличения несущей способности зданий в условиях сейсмического воздействия. Действующие нормы имеют ряд ограничений, связанных со строительством в сейсмических районах, которые отчасти возникли из-за несовершенства методик расчетов положенных в основу нормативных документов. Использование современных кладочных материалов и машинных методик расчетов могут в потенциале расширить область применения кладки из легких бетонов.

3. Дальнейшее развитие исследования данного вопроса могут получить в области поиска методов повышения несущей способности зданий из легких

бетонов при сейсмическом воздействии, за счет вертикального армирования композитными полимерными сетками. Эти методы усиления относительно новы и имеют большой потенциал в повышении несущей способности зданий при сейсмическом воздействии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 30494-2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. – М.: Минрегион России, 2011.-19 с.
2. Горшков А.С., Ливчак В.И. История, эволюция и развитие нормативных требований к ограждающим конструкциям // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. № 3(30). С. 7-37.
3. СНиП II-A.7-71. Строительная теплотехника. Нормы проектирования - М: Госстрой СССР, 1972
4. Гринфельд Г. И. Диалектика нормативных требований к сопротивлению теплопередаче ограждающих конструкций// Жилищное строительство. 2012. № 1. С. 22-24.
5. Смирнов В.И., Грановский А.В. и др. Технический отчет по теме «Определение нормального и касательного сцепления кладки из блоков из ячеистого бетона автоклавного твердения на различных клеевых составах», ОАО "НИЦ "СТРОИТЕЛЬСТВО", Москва, 2013 г.
6. СП 14.13330.2018 Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*.- М.: Стандартинформ, 2018.- 122 с.
7. Смирнов В.И., Грановский А.В. и др. Научно-технический отчет по теме «Проведение исследований конструкций из ячеистобетонных блоков YTONG производства ЗАО «Кесла-Аэроблок-Центр» на клею марки YTONG для сейсмостойкости стен зданий», ОАО "НИЦ "СТРОИТЕЛЬСТВО", Москва, 2010 г.
8. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003. – М.: Минстрой России, 2024.-93 с.

REFERENCES

1. GOST 30494-2011. Residential and public buildings. Indoor microclimate parameters. – M: Ministry of Regional Development of the Russian Federation, 2011.-19 p.
2. Gorshkov A.S., Livchak V.I. History, evolution and development of regulatory requirements for enclosing structures // Construction of unique buildings and structures. 2015. No. 3 (30). P. 7-37.
3. SNiP II-A.7-71. Construction heat engineering. Design standards - M: Gosstroy of the USSR, 1972
4. Grinfeld G.I. Dialectics of regulatory requirements for heat transfer resistance of enclosing structures // Housing construction. 2012. No. 1. P. 22-24.
5. Smirnov V.I., Granovsky A.V. and others. Technical report on the topic "Determination of normal

and tangential adhesion of masonry from autoclaved aerated concrete blocks on various adhesive compositions", JSC "NITs "STROITELSTVO", Moscow, 2013.

6. SP 14.13330.2018 Construction in seismic areas. Updated version of SNiP II-7-81*. - M.: Standartinform, 2018.- 122 p.

7. Smirnov V.I., Granovsky A.V. and others. Scientific and technical report on the topic "Conducting

research of structures from YTONG aerated concrete blocks produced by Kesla-Aeroblok-Center CJSC on YTONG glue for seismic resistance of building walls", JSC "NITs "STROITELSTVO", Moscow, 2010.

8. SP 50.13330.2012. Thermal protection of buildings. Updated version of SNiP 23-02-2003. -M: Ministry of Construction of Russia, 2024.-93 p.

ANALYSIS OF THE STRESS-STRAIN STATE OF MASONRY MADE OF AERATED CONCRETE BLOCKS REINFORCED WITH COMPOSITE POLYMER MESHES

Vasiliev M.V.¹, Belavsky V.A.², Tkachenko O.Y.³

¹ V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Institute "Academy of Construction and Architecture"
181, Kievskaya str., Simferopol, Republic of Crimea, 295493,
¹wmv_sapr@mail.ru, ²belavsky@mail.ru, ³krabeklac@gmail.com

Abstract. The article presents modeling cellular concrete masonry reinforced with composite meshes. Local numerical models were verified by physical experiments. Using three-dimensional models, an assessment of impact on bearing capacity of reinforcing the masonry with composite polymer meshes was made.

Subject: numerical modeling of stress-strain state for buildings made of cellular concrete masonry.

Materials and methods: the research was carried out on numerical models in the LIRA-SAPR software using the finite element method in a physically nonlinear formulation.

Results: using local models, nonlinear characteristics were determined that allow reliable modeling of cellular concrete masonry. Then, using three-dimensional models, an assessment was made of the effect of the usefulness, type and degree of reinforcement of cellular concrete masonry with composite polymer meshes.

Conclusions: cellular concrete masonry is a material that allows for an energy-efficient building. Reinforcement of masonry using composite polymer meshes allows to significantly increase the seismic resistance of the building's load-bearing system.

Key words: cellular concrete, masonry, seismic impact, strength of lightweight concrete masonry, masonry modeling.