

УДК 624.012.04

2.1.1 Строительные конструкции,  
здания и сооружения (технические науки)

# РАСЧЕТ КИРПИЧНОГО ПРОСТЕНКА МЕТОДОМ ПРИВЕДЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Е. А. Страдова, С. А. Еренчинов

Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

## CALCULATION OF A BRICK PARTITION BY THE METHOD OF THE HOMOGENIZED MATERIALS

Ekaterina A. Stradova, Sergey A. Erenchinov

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

**Аннотация.** Расчет каменных конструкций в настоящее время осуществляется на основе исследований и экспериментов прошлого без учета механических характеристик, что приводит к завышениям или занижениям несущей способности. Такая погрешность влияет на образование и развитие трещин в конструкциях. Для решения данной проблемы необходимо разработать методику расчета каменных кладок с учетом механических характеристик ее компонентов.

Целью работы является численное моделирование и расчет каменных конструкций методом приведенных характеристик на примере кирпичного простенка. В качестве объекта исследования выбран кирпичный простенок здания в городе Тюмени по ул. Жуковского, 28. Предмет исследования – напряженно-деформированное состояние кирпичной кладки.

Исследование выполнялось на основе аналитического расчета и численного моделирования в ПК ANSYS и ПК Lira. В результате разработан способ расчета каменной кладки методом приведенных характеристик материалов. Область применения результатов – промышленное и гражданское строительство зданий из каменных конструкций.

**Abstract.** Nowadays, the calculation of masonry structures is based on studies and experiments of the past without taking into account the mechanical characteristics, which leads to overestimation or underestimation of the bearing capacity. Such an error affects the formation and development of cracks in structures. To solve this problem, it is necessary to develop a methodology for calculating brickwork, taking into account the mechanical characteristics of its components.

The purpose of this work is the numerical simulation and calculation of masonry structures by the method of homogenized characteristics of material on the example of a brick partition. As the object of research, the authors selected brick partition of the building on Zhukovsky Street, 28 in Tyumen. The subject of the study is the stress-strain state of the brickwork. The study was performed based on analytical calculation and numerical simulation in PC ANSYS and PC Lira. As a result, a method of calculating brickwork using the method of homogenized material characteristics has been developed. The scope of application of the results is industrial and civil construction of buildings from masonry structures.

**Ключевые слова:** моделирование строительных конструкций, кирпичная кладка, каменные конструкции, приведенный материал

**Key words:** modeling of building structures, brickwork, masonry structures, homogenized material

**Для цитирования:** Страдова, Е. А. Расчет кирпичного простенка методом приведенных материалов / Е. А. Страдова, С. А. Еренчинов. – DOI 10.31660/2782-232X-2023-2-26-37. – Текст: непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2023. – № 2 (104). – С. 26–37.

**For citation:** Stradova, E. A., & Erenchinov, S. A. (2023). Calculation of a brick partition by the method of the homogenized materials. *Architecture, Construction, Transport*, (2(104)), pp. 26-37. (In Russian). DOI 10.31660/2782-232X-2023-2-26-37.

## Введение

Проблема расчета каменной кладки в том, что он производится на основе моделей, экспериментов и исследований прошлых лет. В основе методики нормативной документации<sup>1</sup> лежит эмпирическая зависимость для определения прочности кладки, предложенная В. Л. Онищиком в 1930 году [1]. Полученные им и его учениками результаты положили начало теории разрушения кладки. Позднее, в 1966 г., С. В. Поляков и Б. Н. Фалевич [2] пришли к выводу, что элементы кладки подвержены местному и внецентренному сжатию, растяжению, срезу и изгибу из-за разрушения фундамента, неравномерного распределения раствора, различных свойств кирпича и раствора при деформировании. В работе О. М. Донченко и И. А. Дегтева [3] утверждается, что теория В. Л. Онищика дает точные результаты для кладки из одинарного кирпича и раствора марки 25–75. С увеличением прочности материала будет расти погрешность. О. М. Донченко и И. А. Дегтев считают, что необходимо создать расчетную зависимость, где будут рассматриваться действительные поверхности деформирования и разрушения каменной кладки.

В работах Г. Г. Кашеваровой, А. Ю. Зобачева, М. Л. Иванова [4, 5] рассматривается диаграмма деформирования, полученная различными методами, а также изучаются упругие свойства кирпича и раствора. Анализируя полученные данные, авторы смогли отследить поведение кладки как численно, так и экспериментально, результаты получились близкими по значению.

С. Ю. Лихачева и Д. А. Кожанов [6, 7] пришли к выводу, что создание модели, адекватно описывающей напряженно-деформированное состояние каменных кладок и учитывающей поведение ее компонентов при нагрузке, поможет избежать проведения долгих и дорогих экспериментов и длительных сложных расчетов. Авторы сравнивали результаты эксперимента и расчета модели в ПК ANSYS и получили качественное и количественное совпадение с небольшой погрешностью. Периодичность повторения одних и тех же фрагментов кладки позволяет моделировать материал конструкции как однородную среду, характеристики которой определяются при изучении блоков, из которых состоит кусочно-однородный материал.

Для современных материалов требуется новая методика расчета, так как старая не от-

<sup>1</sup> Каменные и армокаменные конструкции = Masonry and reinforced masonry structures : СП 15.13330.2012 : актуализированная редакция СНиП II-22-81 : утвержден приказом Министерства регионального развития Российской Федерации (Минрегион России) от 29 декабря 2011 г. № 635/5 : введен в действие 01 января 2013 г. – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200092703> (дата обращения: 27.04.2023).

ражает реальную несущую способность кладки и характер трещинообразования и разрушения. В качестве решения данной проблемы В. В. Пангаевым в работе [8] было предложено учитывать деформативные характеристики компонентов кладки, а именно модуль упругости и коэффициент Пуассона.

В данной статье будет рассматриваться расчет каменной кладки с учетом деформативных характеристик компонентов кладки, кирпича и раствора. Приведенный, или гомогенизированный, материал создается в ПК ANSYS Material Designer (приложение для создания композитных материалов).

Сложность моделирования материалов с периодически повторяющейся структурой состоит в большом количестве конечных элементов. Метод конечных элементов, конечно, может быть использован для отображения точной структуры материала в макромоделе, но это нецелесообразно, так как делает невозможными вычисления.

Стандартным подходом к уменьшению конечных элементов для композиционных материалов является гомогенизация – технологический процесс, проводимый над многофазной системой, в результате которого уменьшается неоднородность распределения частиц материалов по гетерофазной системе.

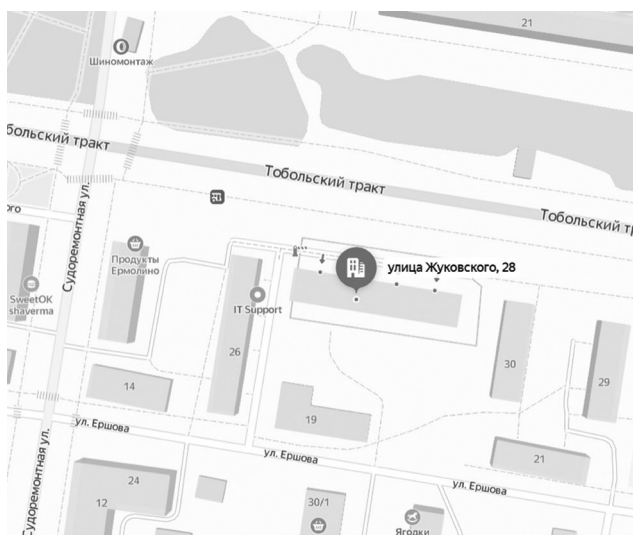


Рис. 1. Исследуемый объект: кирпичный простенок здания, г. Тюмень, ул. Жуковского, 28  
Fig. 1. Object under study: brick partition, 28 Zhukovsky St., Tyumen

Свойства гомогенизированного материала усредняются, что снижает время и трудоемкость вычислений.

### Объект и методы исследования

Объект исследования – простенок кирпичного здания в г. Тюмени по ул. Жуковского, 28, признанного аварийным из-за образования трещин при разрушении фундамента (рис. 1).

Кирпичный простенок рассчитывается тремя способами, результаты расчета подлежат сравнению, по итогам которого можно будет сделать вывод о работоспособности расчета кирпичной кладки методом приведенных материалов.

### Результаты и обсуждение

Создание приведенного материала в ПК ANSYS Material Designer

1. Создаем модель кладки в ПК Revit и загружаем в ПК ANSYS.

В Material Designer материал имеет периодически повторяющуюся структуру, которую можно описать представительной элементарной ячейкой.

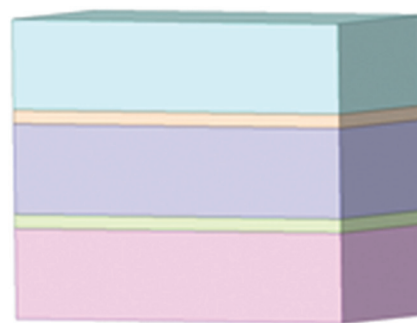


Рис. 2. Модель кладки для создания приведенного материала  
Fig. 2. Masonry model for creating homogenized material

В качестве элементарной ячейки примем небольшой фрагмент кладки из кирпича размером 250 × 120 × 65 мм и раствора толщиной 15 мм. Как правило, достаточно кладки в три ряда кирпича без вертикальных элементов, так как вертикальными деформациями можно пренебречь. Полученная модель представлена на рис. 2.

2. Задаем характеристики материалов, то есть кирпича и раствора, в Static Structural – Engineering Data (рис. 3).

Outline of Schematic A2, B2: Engineering Data				
	A	B	C	
1	Contents of Engineering Data			Source Description
2	Material			
3	кирпич		General_Materials.xml	
4	раствор		General_Materials.xml	
*	Click here to add a new material			

Properties of Outline Row 4: раствор				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	2.3E-09	tonne mm <sup>-3</sup>	
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
5	Coefficient of Thermal Expansion	1.4E-05	C <sup>-1</sup>	
6	Isotropic Elasticity			
7	Derive from	Young's Modulu...		
8	Young's Modulus	3200	MPa	
9	Poisson's Ratio	0.2		
10	Bulk Modulus	1777.8	MPa	
11	Shear Modulus	1333.3	MPa	
12	Tensile Yield Strength	0.61	MPa	
13	Compressive Yield Strength	3.2	MPa	
14	Tensile Ultimate Strength	0.61	MPa	
15	Compressive Ultimate Strength	3.2	MPa	

Рис. 3. Процесс задания характеристик кирпича и раствора в Engineering Data  
Fig. 3. The process of setting brick and mortar characteristics in Engineering Data

3. Загружаем в Material Designer фрагмент кладки и присваиваем каждому из тел материалы.
4. Генерируем сетку конечных элементов (КЭ) (рис. 4).
5. Приступаем к расчету, в котором используются заранее установленные случаи загрузки для определения реакций.
6. В результате расчета получаем набор ортотропных свойств, который можно использовать в дальнейших расчетах строительных конструкций (рис. 5).

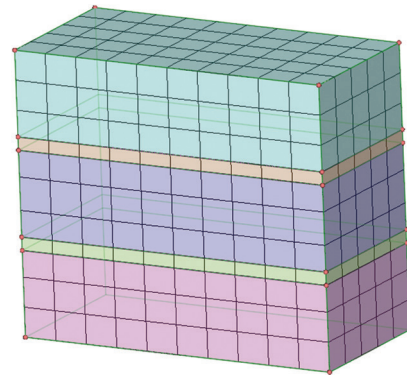


Рис. 4. Сгенерированная сетка конечных элементов  
Fig. 4. Generated mesh of finite elements

*Расчет кирпичного простенка. Аналитический расчет*

На рис. 6 представлены геометрические характеристики кирпичного простенка.

Расчет выполнен по учебнику [9]. Исходные данные:

- количество этажей  $n - 5$ ;
- временная нагрузка на перекрытия  $v - 7 \text{ кН/м}^2$ ;
- высота этажа – 4,2 м;
- ширина  $b_n$  и высота  $h_n$  оконного проема – 1,6 и 2,4 м;
- толщина стены 2,5 кирпича  $h - 64 \text{ см}$ ;
- марка кирпича – 75;

Outline of Schematic C2, D2, E2: Engineering Data				
	A	B	C	E
1	Contents of Engineering Data			Source
2	Material			Description
3	User Defined кирпич/раствор 2			C:\Users\Admin\AppData\Local\Temp\кирпичн
4	кирпич			General_Materials.xml
5	раствор			General_Materials.xml
*	Click here to add a new material			

Properties of Outline Row 3: User Defined кирпич/раствор 2				
	A	B	C	E
1	Property	Value	Unit	
2	Orthotropic Elasticity			
3	Young's Modulus X direction	6422.7	MPa	
4	Young's Modulus Y direction	6422.7	MPa	
5	Young's Modulus Z direction	6179.2	MPa	
6	Poisson's Ratio XY	0.10477		
7	Poisson's Ratio YZ	0.11104		
8	Poisson's Ratio XZ	0.11104		
9	Shear Modulus XY	2906.8	MPa	
10	Shear Modulus YZ	2736.9	MPa	
11	Shear Modulus XZ	2736.9	MPa	
12	Tensile Yield Strength	2.6	MPa	
13	Compressive Yield Strength	2.6	MPa	

Рис. 5. Характеристики приведенного материала, полученные в результате расчета  
Fig. 5. Characteristics of homogenized material obtained as a result of the calculation

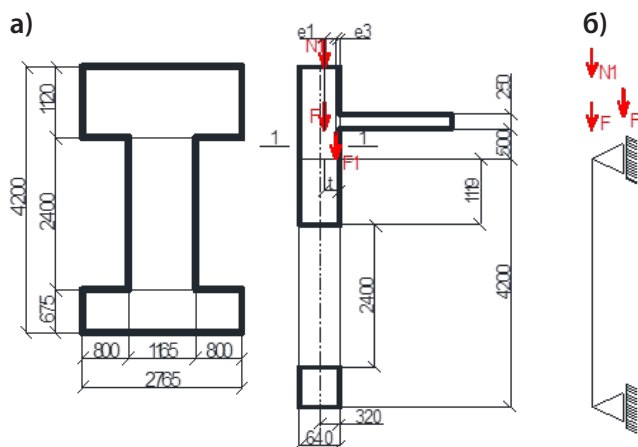


Рис. 6. Характеристики кирпичного простенка:  
 а) геометрия простенка; б) расчетная схема  
 Fig. 6. Characteristics of brick partition:  
 а) geometry of partition; б) calculation scheme

- марка раствора – 50;
- плотность кирпича  $\rho$  – 1 800 кг/м<sup>3</sup>;
- нормативная снеговая нагрузка – 1,5 кН/м<sup>2</sup>;
- ширина простенка  $b_{np}$  – 1,165 м.

Определение расчетных усилий в кирпичном простенке

Собственный вес стены всех вышележащих этажей:

$$N_1 = 25 + 102,21 \times 4 = 434 \text{ кН.}$$

Нагрузка от перекрытия и покрытия вышележащих этажей:

$$F = 162,1 + 284,4 \times 3 = 1016,4 \text{ кН.}$$

Нагрузка от перекрытия, расположенного над рассматриваемым этажом:

$$F_1 = 284,6 \text{ кН.}$$

Расчетная продольная сила сечения 1-1:

$$N_{1-1} = F_1 + F + \Delta F + N_1 = 434 + 1016,4 + 284,6 = 1795 \text{ кН.}$$

Расстояние от точки приложения опорной реакции до внутренней грани стены, если глубина заделки ригеля  $t = 250$  мм:

$$e_3 = \frac{l}{3 \times t} = 83 \text{ мм} > 70 \text{ мм, принимаем } 70 \text{ мм.}$$

Эксцентриситет нагрузки  $F_1$  относительно центра тяжести простенка:

$$e_1 = \frac{h}{2} - 70 = 250 \text{ мм.}$$

Расчетный изгибающий момент в сечении 1-1:

$$M_{1-1} = \frac{F_1 \times e_1 \times M_1}{H_{эм}} = \frac{284,6 \times 0,25 \times 3,75}{4,2} = 63,54 \text{ кН.}$$

Проверка несущей способности кирпичного простенка

Эксцентриситет расчетной продольной силы  $N_{1-1}$  относительно центра тяжести сечения 1-1:

$$e_0 = \frac{M_{1-1}}{N_{1-1}} = \frac{63,55 \times 10^6}{1795 \times 10^3} = 35,4 \text{ мм.}$$

Высота сжатой части поперечного сечения кирпичного простенка:

$$h_c = h - 2e_0 = 640 - 2 \times 35,4 = 569,2 \text{ мм.}$$

Гибкость сжатой части поперечного сечения кирпичного простенка:

$$\lambda_{hc} = \frac{l_0}{h_c} = \frac{4200}{569,2} = 7,4.$$

Коэффициент продольного изгиба для сжатой части сечения 1-1:  $\phi_c = 0,94$ .

Коэффициент продольного изгиба при внецентренном сжатии:

$$\phi_1 = \frac{(\phi - \phi_c)}{2} = \frac{(0,95 - 0,94)}{2} = 0,005.$$

$$\text{Коэффициент } \omega = 1 + \frac{e_0}{h} = 1 + \frac{35,4}{640} = 1,055 < 1,45.$$

Несущая способность простенка в сечении 1-1 как внецентренно сжатого элемента:

$$\begin{aligned} N &= m_g \times \phi \times R \times A \times \left(1 - \frac{2 \times e_0}{h}\right) \times \omega = \\ &= 1 \times 0,95 \times 1,3 \times 745600 \times \left(1 - \frac{2 \times 35,4}{640}\right) \times 1,06 = \\ &= 1,2 \text{ МПа} < N_{1-1} = 1,795 \text{ МПа.} \end{aligned}$$

- Расчет кирпичного простенка в ПК ANSYS*
1. Задание материалов. В качестве материала примем приведенный материал. Static Structural – Engineering Data (рис. 7).
  2. Создание геометрии. Static Structural – Geometry. Загружаем модель, заранее созданную в ПК Revit. Модель состоит из простенка и плиты перекрытия (рис. 8).

Outline of Schematic C2, D2, E2: Engineering Data				
	A	B	C	D
1	Contents of Engineering Data			Source
2	Material			Description
3	User Defined кирпич /раствор 2			C:\Users\Admin\AppData\
4	кирпич			General_Materials.xml
5	раствор			General_Materials.xml
*	Click here to add a new material			

Properties of Outline Row 3: User Defined кирпич/раствор 2				
	A	B	C	D
1	Property	Value	Unit	
2	Orthotropic Elasticity			
3	Young's Modulus X direction	6422.7	MPa	
4	Young's Modulus Y direction	6422.7	MPa	
5	Young's Modulus Z direction	6179.2	MPa	
6	Poisson's Ratio XY	0.10477		
7	Poisson's Ratio YZ	0.11104		
8	Poisson's Ratio XZ	0.11104		
9	Shear Modulus XY	2906.8	MPa	
10	Shear Modulus YZ	2736.9	MPa	
11	Shear Modulus XZ	2736.9	MPa	
12	Tensile Yield Strength	2.6	MPa	
13	Compressive Yield Strength	2.6	MPa	

Рис. 7. Задание приведенного материала в Engineering Data  
 Fig. 7. Settings of homogenized material in Engineering Data

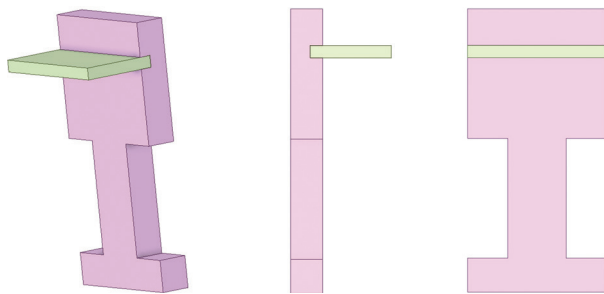


Рис. 8. Геометрия простенка  
 Fig. 8. Partition geometry

3. Граничные условия. Static Structural – Insert – Displacement. Сверху простенка и плиты запрещаем перемещения по осям X, Y. Снизу простенка жесткая заделка Static Structural – Insert – Fixed Support. Прикладываем нагрузку на простенок 1 450 кН и плиту 284,7 кН. Static Structural – Insert – Force (рис. 9).
4. Производим расчет и анализируем значение деформаций (рис. 10) и напряжений (рис. 11).

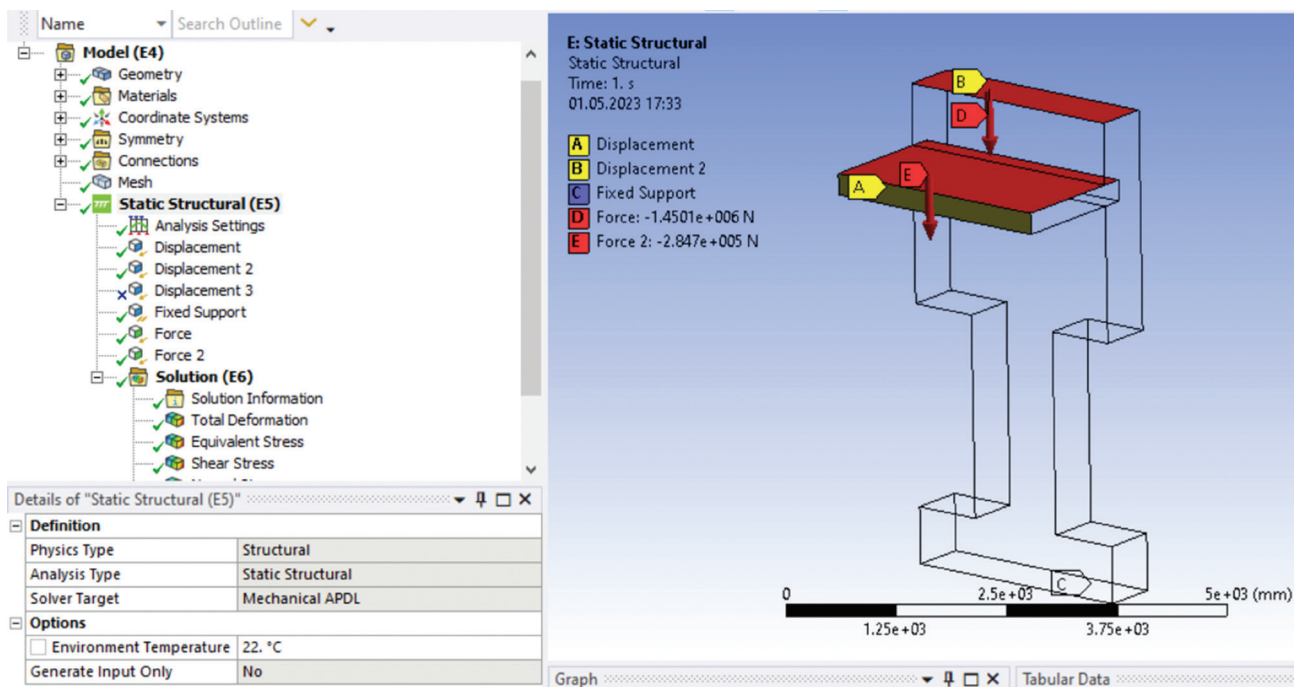


Рис. 9. Граничные условия и нагрузка  
Fig. 9. Boundary conditions and load

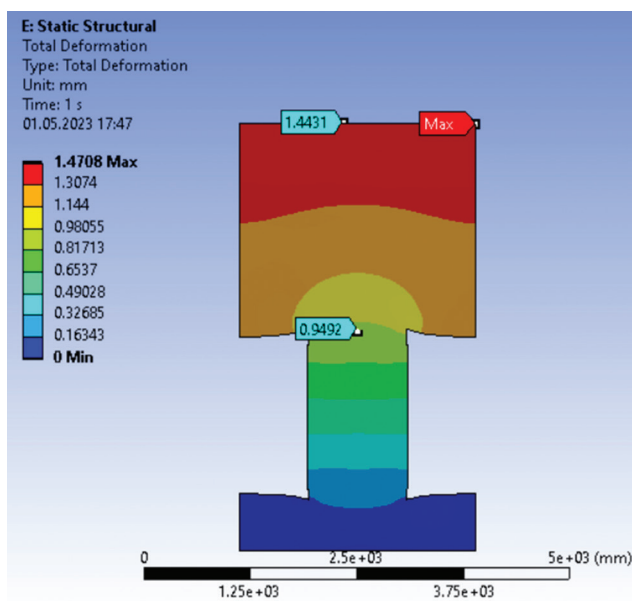


Рис. 10. Деформации, полученные в результате расчета  
Fig. 10. Deformations resulting from the calculation

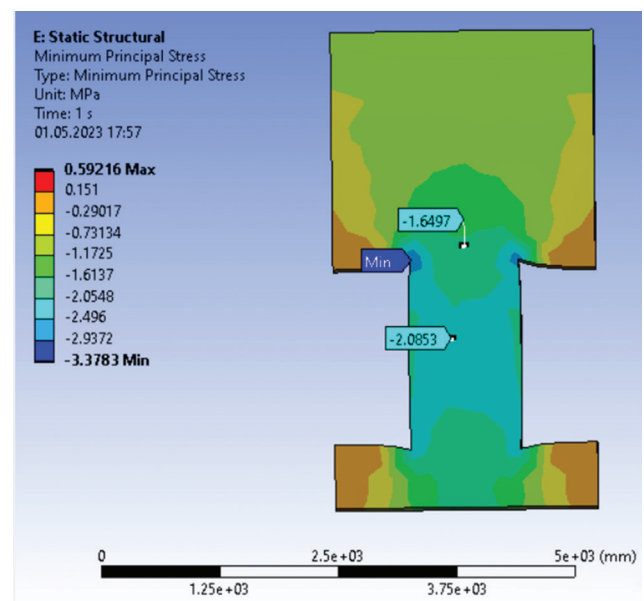


Рис. 11. Напряжения, полученные в результате расчета  
Fig. 11. Stresses resulting from the calculation

Расчет кирпичного простенка в ПК ЛИРА  
Простенок задается пластиной. Архитектурные элементы – пластина. Разбиваем модель на конечные элементы.  
Добавить КЭ – шаг 0,5 м.

В качестве характеристик материала принимаем приведенные характеристики.  
Назначение связей. Снизу запрещаем все перемещения по X, Y, Z. Сверху и сбоку запрещаем перемещения по X, Y.



Нагружение. Назначение – нагрузки – библиотека нагрузок – сосредоточенная сила – направление вдоль оси Z.

Прикладываем нагрузку на простенок 1 450 кН и на место опирания плиты перекрытия 284,7 кН. Полученная модель простенка приведена на рис. 12.

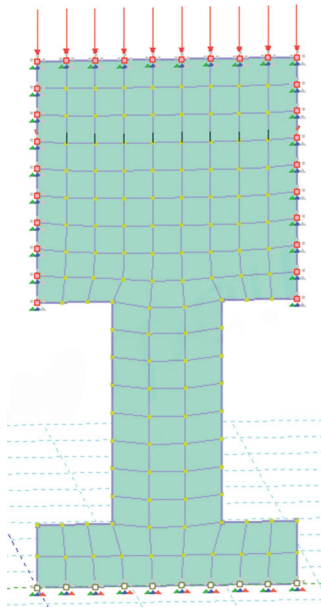


Рис. 12. Модель кирпичного простенка в ПК Лира  
Fig. 12. Model of a brick partition in PC Lira

Выполняем расчет и получаем результаты, которые приведены на рис. 13, 14.

### Обсуждение

Сравним аналитический расчет кирпичного простенка с численным расчетом в ПК Лира и ПК ANSYS (таблица 1, рис. 15).

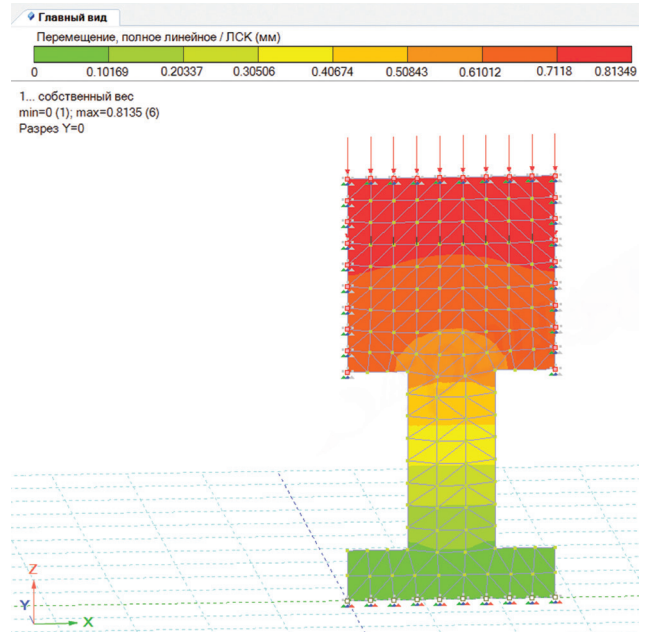


Рис. 13. Перемещения, полученные при расчете  
Fig. 13. Movements resulting from the calculation

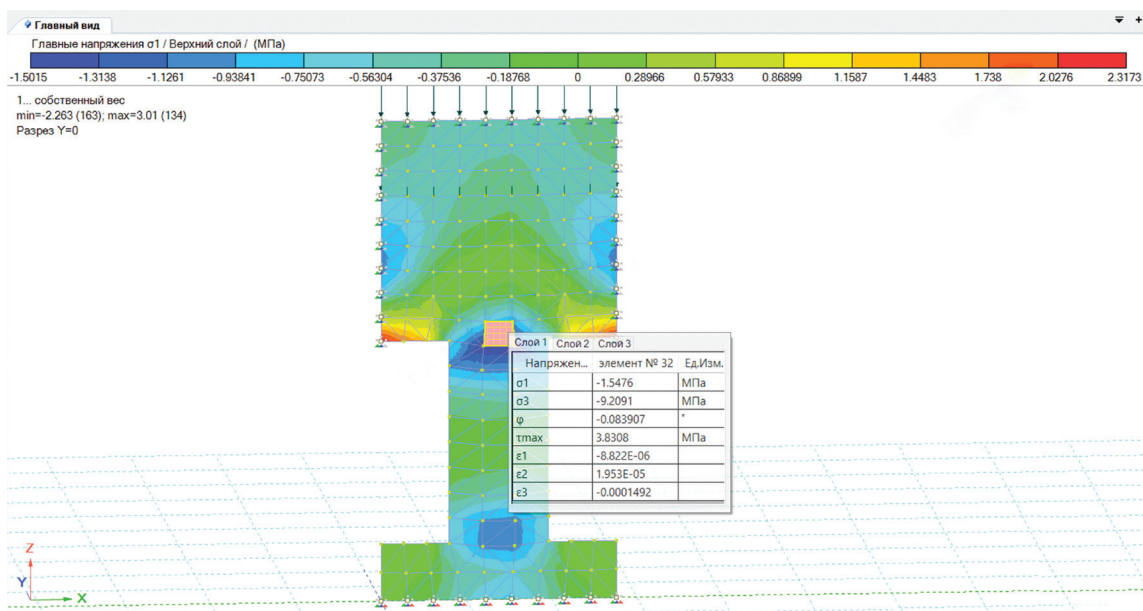


Рис. 14. Напряжения, полученные в результате расчета  
Fig. 14. Stresses resulting from the calculation

Сравнение напряжений  
Stress comparison

Расчет	Напряжения в простенке, МПа
Аналитический	1,2
ПК LIRA	1,55
ПК ANSYS	1,64

Таблица 1  
Table 1

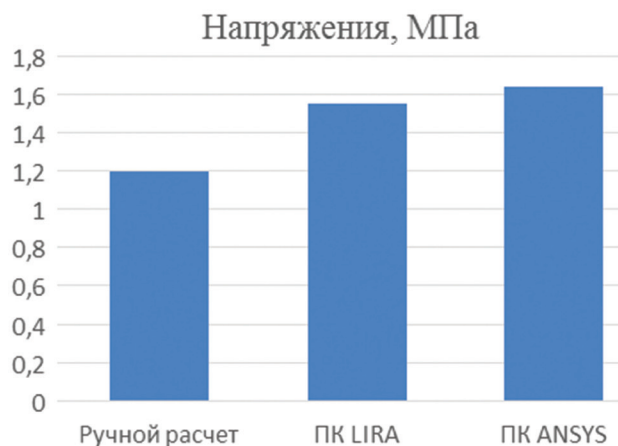


Рис. 15. Диаграмма напряжений  
Fig. 15. Stress diagram

### Вывод

Таким образом, в данной статье было рассмотрено применение метода приведенных характеристик на реальном объекте. В качестве объекта рассматривался кирпичный простенок здания в г. Тюмени.

Производился аналитический расчет кирпичного простенка, численный расчет с применением метода приведенных материалов в ПК ANSYS и ПК Lira. Сравнив результаты, мы получили совпадение напряжений, рассчитанных с помощью программных комплексов, с разницей в

5 %. Это значит, что приведенный материал, сгенерированный в ПК ANSYS Material Designer, можно применять в любом программном комплексе, а не только в ANSYS.

Сравнив аналитический расчет обычным методом и численный расчет методом приведенных характеристик, получили разницу 30 %. Это значит, что при учете деформативных характеристик в расчете получаются более высокие значения напряжений, при учете которых можно избежать образования трещин и разрушения кладки в каменных конструкциях.

### Библиографический список

1. Онищик, Л. И. Каменные конструкции промышленных и гражданских зданий : утверждено ВКВШ при СНК СССР в качестве учебника для строительных вузов и факультетов / Л. И. Онищик. – Москва ; Ленинград : Госстройиздат, 1939. – 208 с. – Текст : непосредственный.
2. Поляков, В. С. Проектирование каменных и крупнопанельных конструкций : учебное пособие для инженерно-строительных вузов и факультетов / С. В. Поляков, Б. Н. Фалевич. – Москва : Высшая школа, 1966. – 239 с. – Текст : непосредственный.
3. Донченко, О. М. Деформации каменной кладки при центральном кратковременном сжатии / О. М. Донченко, И. А. Дегтев. – Текст : непосредственный // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2013. – № 3. – С. 44–46.
4. Кашеварова, Г. Г. Моделирование процесса разрушения кирпичной кладки / Г. Г. Кашеварова, А. Ю. Зобачева. – Текст : непосредственный // Вестник Пермского государственного технического университета. Строительство и архитектура. – 2010. – № 1. – С. 106–116.
5. Кашеварова, Г. Г. Натурные и численные эксперименты, направленные на построение зависимости напряжения от деформации кирпичной кладки / Г. Г. Кашеварова, М. Л. Иванов. – Текст : непосредственный // Приволжский научный вестник. – 2012. – № 8. – С. 10–15.

6. Лихачева, С. Ю. Моделирование процессов деформирования каменных кладок с применением ПК ANSYS / С. Ю. Лихачева, Д. А. Кожанов. – Текст : непосредственный // Труды научного конгресса 13-го Российского архитектурно-строительного форума, Нижний Новгород, 19–22 мая 2015 года / ответственный редактор А. А. Лапшин. – Нижний Новгород : Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 2016. – С. 68–71.
7. Лихачева, С. Ю. Численное моделирование процессов деформирования и разрушения сред с регулярной структурой / С. Ю. Лихачева. – Текст : непосредственный // Вестник МГСУ. – 2011. – № 2-2. – С. 158.
8. Пангаев, В. В. Развитие расчетно-экспериментальных методов исследования прочности кладки каменных конструкций : специальность 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Пангаев Валерий Владимирович. – Новосибирск, 2009. – 267 с. – Текст : непосредственный.
9. Бондаренко, В. М. Железобетонные и каменные конструкции : учебник для вузов / В. М. Бондаренко, Д. Г. Суворкин. – Москва : Высшая школа, 1987 – 384 с. – Текст : непосредственный.

#### References

1. Onishchik, L. I. (1939). Kamennye konstruksii promyshlennykh i grazhdanskikh zdaniy: utverzhdeno VKVSh pri SNK SSSR v kachestve uchebnika dlya stroitel'nykh vtuzov i fakul'tetov. Moscow, Leningrad, Gosstroyizdat Publ., 208 p. (In Russian).
2. Polyakov, V. S., & Falevich, B. N. (1966). Proektirovanie kamennykh i krupnopanel'nykh konstruksiy : uchebnoe posobie dlya inzhenerno-stroitel'nykh vuzov i fakul'tetov. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 239 p. (In Russian).
3. Donchenko, O. M., & Degtev, I. A. (2013). Deformatsii kamennoy kladki pri tsentral'nom kratkovremennom szhatii. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, (3), pp. 44-46. (In Russian).
4. Kashevarova, G. G., & Zobacheva, A. Yu. (2010). Modelirovanie protsessa razrusheniya kirpichnoy kladki. Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura, (1), pp. 106-116.
5. Kashevarova, G. G., & Ivanov, M. L. (2012). Natural and numerical experiments aimed at building the stress-strain brickwork. Privolzhskiy nauchnyy vestnik, (8), pp. 10-15. (In Russian).
6. Likhacheva, S. Yu., & Kozhanov, D. A. (2016). Modelirovanie protsessov deformirovaniya kamennykh kladok s primeneniem PK ANSYS. Trudy nauchnogo kongressa 13-go Rossiyskogo arkhitekturno-stroitel'nogo foruma, Nizhniy Novgorod, May, 19–22. Nizhniy Novgorod, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering Publ., pp. 68-71. (In Russian).
7. Likhacheva, S. Yu. (2011). Numerical modeling of process of distortion and destruction of regular structure circumferences. Vestnik MGSU, (2-2), p. 158. (In Russian).
8. Pangaev, V. V. (2009). Razvitie raschetno-eksperimental'nykh metodov issledovaniya prochnosti kladki kamennykh konstruksiy : spetsial'nost' 05.23.01 "Stroitel'nye konstruksii, zdaniya i sooruzheniya" : dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk. Novosibirsk, Novosibirsk State University of architecture and civil engineering Publ., 267 p. (In Russian).
9. Bondarenko, V. M., & Suvorkin, D. G. (1987). Zhelezobetonnye i kamennye konstruksii: uchebnik dlya vuzov. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 384 p. (In Russian).

---

### **Сведения об авторах**

Страдова Екатерина Александровна, обучающийся кафедры строительных конструкций, Тюменский индустриальный университет, e-mail: rinast99@mail.ru

Еренчинов Сергей Александрович, канд. техн. наук, доцент кафедры строительных конструкций, Тюменский индустриальный университет, e-mail: erenchinov@yandex.ru

### **Information about the authors**

Ekaterina A. Stradova, Student at the Department of Building Structures, Industrial University of Tyumen, e-mail: rinast99@mail.ru

Sergey A. Erenchinov, Candidate in Engineering, Associate Professor at the Department of Building Structures, Industrial University of Tyumen, e-mail: erenchinov@yandex.ru

*Получена 15 мая 2023 г., одобрена 06 июня 2023 г., принята к публикации 13 июня 2023 г.*

*Received 15 May 2023, Approved 06 June 2023, Accepted for publication 13 June 2023*