

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ОЦЕНКЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ ИЗ КАМЕННОЙ КЛАДКИ

А.И. Бедов¹, А.И. Габитов², А.А. Галлямов², А.С. Салов², А.М. Гайсин²

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,
г. Москва, РОССИЯ

² Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, РОССИЯ

Аннотация: Рассмотрены результаты исследований по анализу напряженно-деформированного состояния конструкций несущих стен из высокопустотных керамических изделий. Представлен способ моделирования каменной кладки методом конечных элементов. Выполнены экспериментальные исследования конструкций кладок из производимых в Республике Башкортостан высокопустотных керамических изделий, установлен характер их работы под нагрузкой, предложен механизм разрушения. Приведены результаты сравнительной оценки расчетов в программном комплексе и традиционного «ручного» расчета.

Ключевые слова: высокопустотные керамические изделия, теплотехнический расчет, метод конечных элементов, напряженно-деформативное состояние, каменные здания, энергоэффективность, модель.

APPLICATION OF COMPUTER SIMULATION IN THE EVALUATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF LOAD-BEARING STRUCTURES OF BUILDINGS MASONRY

*Anatoliy I. Bedov¹, Azat I. Gabitov², Azat A. Gallyamov², Aleksandr S. Salov²,
Askar M. Gaisin²*

¹ National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, RUSSIA

² Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, RUSSIA

Abstract: The results of studies on the analysis of the stress-strain state of the structures of bearing walls of high-hollow pottery. The way of modeling masonry finite element method. The experimental study of masonry structures produced in the Republic of Bashkortostan high-hollow pottery, set the nature of their work load, the mechanism of destruction. The results of the comparative evaluation of the calculations in the software package and the traditional “manual” calculation.

Key words: high-hollow ceramic products, Thermal calculation, finite element method, stress-deformability of the state, stone buildings, energy efficiency, the model.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящее время строительная отрасль в России динамично развивается. Активно применяются новые строительные материалы и технологии. В связи с направленностью

на энерго- и ресурсосбережение они совершенствуются в сторону снижения энергозатратности промышленных производств и повышения энергоэффективности материалов и конструкций. Возросшие требования к теплозащитным свойствам наружных стен зданий привели к расширению номенклатуры

эффективных изделий, в том числе и керамических. Улучшения теплозащитных качеств можно достигнуть повышением материалоемкости стен с увеличением их толщины [1-4] в 2-3 раза для обеспечения требований нормативной документации. Поэтому одним из оптимальных вариантов сокращения расходов тепла и защиты окружающей среды от лишних промышленных выбросов является повышение термического сопротивления наружных стен за счет производства керамических изделий со сниженной средней плотностью [5,6].

2. ИСПЫТАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ

На базе научно-образовательного центра инновационных технологий Архитектурно-строительного института Уфимского государственного нефтяного технического университета были проведены экспериментальные исследования физико-механических свойств керамического крупноформатного пустотелого камня с прямоугольными пустотами Porikam™, выпускаемого на кирпичном заводе «Амстрон» Аургазинского района Республики Башкортостан [5]. Вид камня приведен на рис. 1.



Рисунок 1. Трещинообразование образца.

В 1950-е годы Л.И. Онищик, стремясь объяснить упругие и механические свойства пустотелого кирпича, предложил рабочую модель кирпича пустотностью 25%. На рис. 2 показана рабочая модель структуры строи-

тельной керамики, отражающая механическую структуру кирпича.

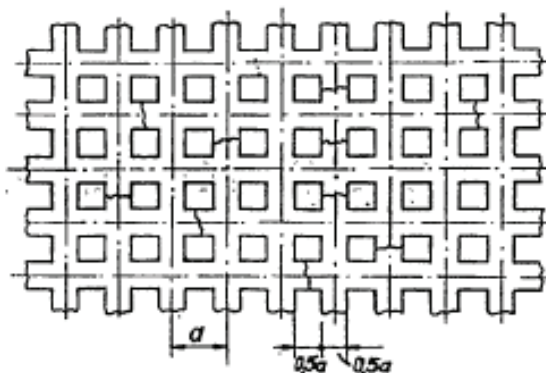


Рисунок 2. Рабочая модель структуры строительной тонкостенной керамики (пустотность 25%) Л.И. Онищика.

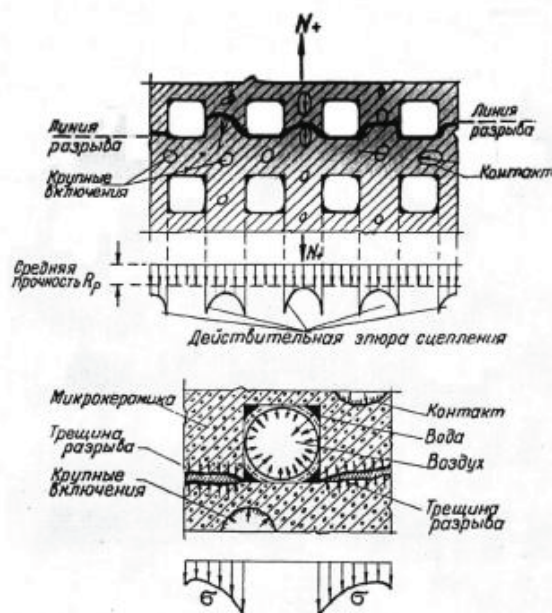


Рисунок 3. Рабочая модель структуры строительной тонкостенной керамики И.А. Рохлина.

И.А. Рохлин в 1940-50-е годы провел экспериментальные исследования элементов сборных армокерамических перекрытий, установил влияние температурно-влажностного состояния на прочность керамики, исследовал прочность, деформативность, усталость и ударную вязкость изделий из керамики. Он также предложил рабочую

модель структуры строительной керамики, основывавшуюся на модель Л.И.Онищика (рис. 3). Анализ проведенных испытаний показал, что от формы, характера и взаимного расположения составляющих керамики зависят ее механические свойства, а для получения полных результатов по прочности изделия необходимо определение прочности по всем трем направлениям [7,8].

3. ПОСТРОЕНИЕ СТРУКТУРЫ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ

Сложность моделирования заключается в том, что каменная кладка является монолитным неоднородным упругопластическим материалом. Даже при равномерном распределении нагрузки по всему сечению сжатого элемента камень и раствор в кладке находятся в условиях сложного напряженного состояния. Они одновременно подвержены внецентренному сжатию, изгибу, растяжению, срезу и смятию [9, 10].

Моделирование кладки как кусочно-однородной среды выполняется на основе структурного (дискретного) моделирования с использованием критериев прочности материалов базовых элементов, определенных механизмов разрушения внутренних связей между базовыми элементами и соответствующих им критериев прочности связей. Структурный подход представляет собой концепцию разработки моделей, основанных на внутренней структуре объекта, что позволяет описать и исследовать процесс деформирования объекта, определяемый свойствами элементов структуры последнего.

Большинство действующих подходов к анализу НДС каменной кладки базируются на ограниченном тремя типами механизме разрушения. В некоторых работах исследуется работа каменной кладки преимущественно по критерию сдвига в горизонтальном растворном шве. При этом моделирование тела шва выполнено в классической упругопластической постановке Друккера-Прагера,

а узел соединения раствора и кирпича принят идеально упругим.

Некоторые авторы предлагают рассмотреть кладку как упорядоченную структуру каменной кладки, состоящей из кусочно-однородных элементов. Экспериментально установленная роль интерфейсных элементов в формировании НДС каменной конструкции при ее нагружении, приводят к выводу о целесообразности применения концепции структурного подхода в моделировании каменных конструкций при теоретических исследованиях процесса их деформирования и разрушения под нагрузкой. При этом важнейшим условием формирования моделей, адекватно отражающих работу композитного материала под нагрузкой, является учет особенностей механизмов разрушения, реализующихся при двухосном напряженном состоянии. Установлены (на основе анализа и обобщения данных ранее выполненных исследований) деформационные свойства каменной кладки как композитной разномодульной среды, учитывающие условия работы материалов и напряженное состояние, а также частные характеристики прочности базовых материалов (кирпич и раствор), что обеспечивает корректное моделирование работы материалов кладки в рамках дискретной концепции. Использование системы частных характеристик прочности каменной кладки позволяет выполнить оценку прочности в любой локальной зоне расчетной модели. На основе оценки прочности в локальной зоне представляется возможным отследить изменение структуры расчетной модели: при исчерпании прочности элемента модели по какому-либо критерию такой элемент должен быть исключен из ансамбля модели при работе только по конкретному превышенному критерию. Принцип частных характеристик прочности композитного материала (а каменная кладка является кусочно-однородным разномодульным композитом) является определяющим условием возможности использования метода структурного моделирования [11].

Кладку стен из рассматриваемого материала было принято моделировать в виде четырех или трех-узловых пластин с заданными жесткостными характеристиками (модуль упругости и коэффициент Пуассона) исходя из экспериментальных исследований над кладкой из двух блоков, так как в нормативных документах в настоящее время нет данных по рассматриваемому материалу. Учет деформирования каменной конструкции по способу, являющегося наиболее подходящим для расчета кладок, как упруго-пластического материала, однако не представляется возможным ввиду большого числа элементов и узлов в схеме 9-ти, тем более 12-ти этажного здания, необходимого рассчитать компьютеру. В связи с этим, при помощи ПК SCAD [12] возможно выполнить общую оценку напряженного состояния несущих стен, но при проектировании реальных объектов необходимо их рассчитывать вручную согласно СП 15.13330.2012. Рассмотрен жилой дом переменной этажности: 9 и 12 этажей высотой этажа 2,8 м с размерами в плане 40,8х12,6 м и с подвальным помещением высотой 2,5 м. Высота здания 25,2 м и 33,6 м соответственно (рис. 4).

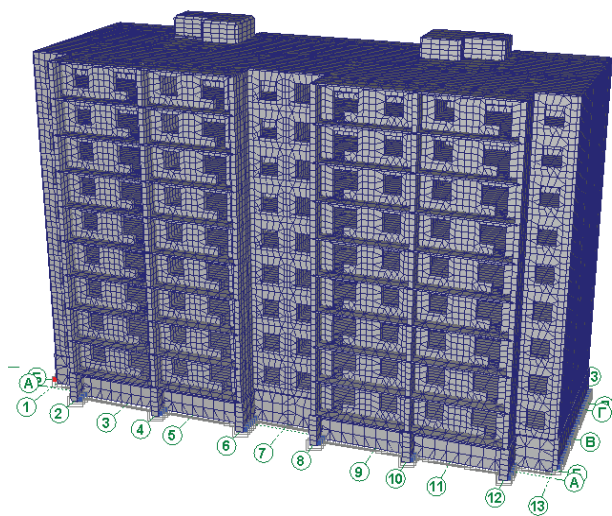


Рисунок 4. Расчетная схема 9-этажного жилого здания.

Оконные проемы размером 1,3х1,4 м. Для оценки характеристик рассматриваемого ма-

териала рассматривались 2 варианта толщины наружных стен зданий: 380 мм и 510 мм, маркировкой блоков 10,7НФ и 14,3НФ соответственно.

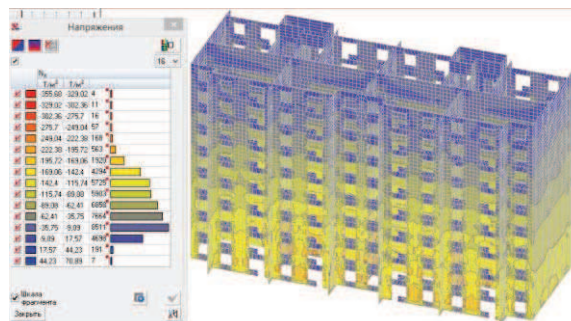


Рисунок 5. Усилия Nx в стенах 9-этажного здания с толщиной стен 380 мм.

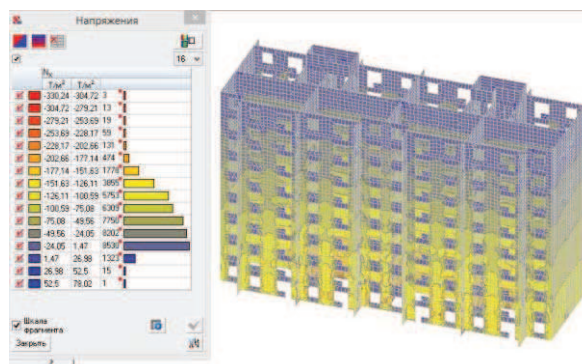


Рисунок 6. Усилия Nx 9 этажного здания с толщиной стен 510 мм.

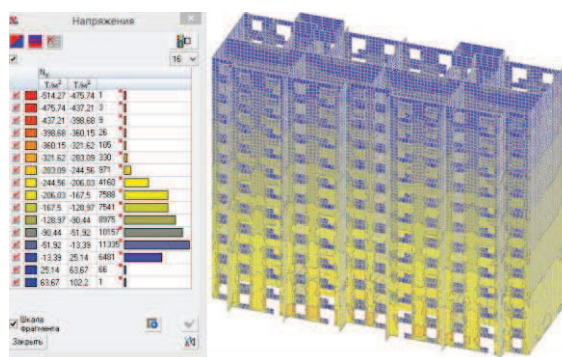


Рисунок 7. Усилия Nx в стенах 12-этажного здания с толщиной стен 380 мм.

Таблица 1. Жесткостные характеристики вертикальных элементов рассчитываемого здания.

Элемент здания	Материал	Толщина, мм	Начальный модуль упругости E_0 , МПа	Расчетный модуль упругости $E=0,5E_0$	Коэффициент Пуассона	Объемный вес, кг/м ³
Наружные стены	Высокопустотный керамический камень 10,7 НФ, раствор цементно-песчаный М100	380(510)	7651	3897	0,13	800
Внутренние стены		250				
Лифтовая, лестничная шахта	Кирпич полнотелый керамический М100, раствор цементно-песчаный М100	250	3600	1800	0,1	1800

Таблица 2. Результаты расчетов здания разной этажности и различных вариантов типов камня.

Полученные значения в ПК SCAD	9 эт. с несущими стенами из блока 10,7НФ толщиной 380 мм	9 эт. с несущими стенами из блока 14,3НФ толщиной 510 мм	12 эт. с несущими стенами из блока 10,7НФ толщиной 380 мм	12 эт. с несущими стенами из блока 14,3НФ толщиной 510 мм
Максимальное значение напряжения N_x , т/м ² простенка 1 этажа под перемычкой, как наиболее загруженного участка	242	227,5	324,5	253,7
Расчетное сопротивление, определенное по СП [34], т/м ²	165			
Разница	-31%	-27%	-49%	-35%
Расчетное сопротивление, определенное экспериментально, т/м ²	234,4			
Разница	-3%	+3%	-27%	-9%

Результаты анализа вариантов толщин стен и этажности здания приведены в таблице 2.

На основе проведенных исследований можно сказать, что применение в качестве несущих стен высокопустотных керамических изде-

лий возможно, но с соблюдением специальных мероприятий, увеличивающих несущую способность каменной кладки на нижних этажах зданий.

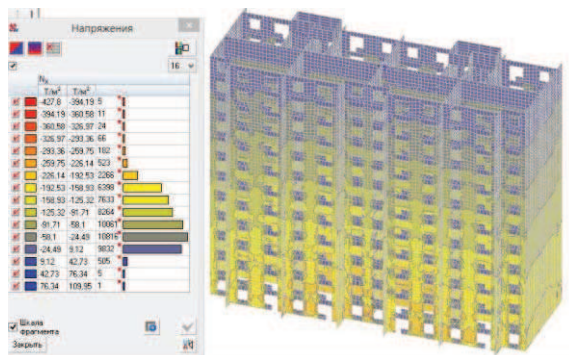


Рисунок 8. Усилия N_x 12 этажного здания с толщиной стен 510 мм.

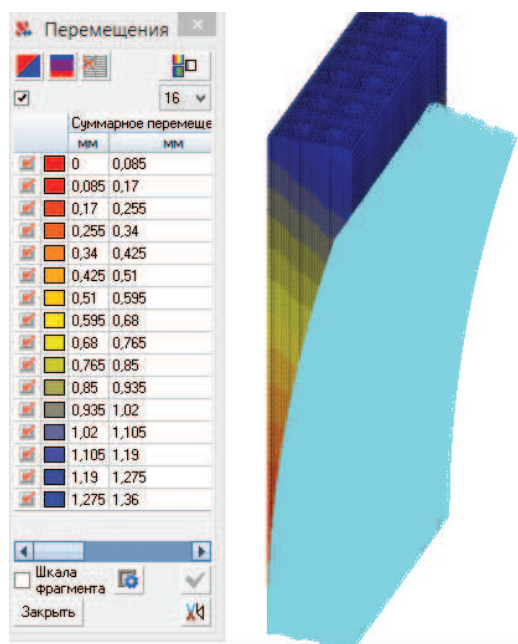


Рисунок 9. Суммарные перемещения простенка

По результатам расчетов не рекомендуется применять рассматриваемый материал в качестве несущих стен в зданиях выше 12 этажей без определенных мероприятий.

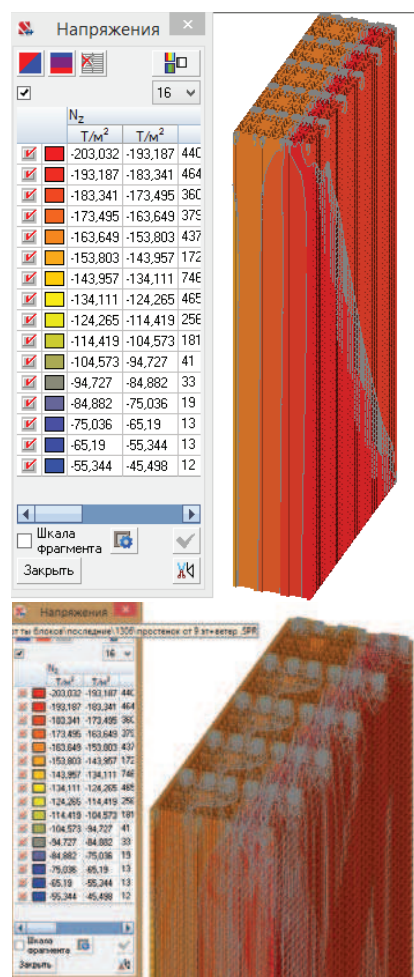


Рисунок 10. Напряжения N_z простенка.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Использование современных программных комплексов для расчета каменных конструкций в отличие от традиционных методов (использованных проектировщиками с 50-х годов прошлого века) позволяет более точно оценить целостную картину реального напряженно-деформированного состояния не только отдельных простенков, но и всего здания в целом, выявить перераспределение напряжений и наиболее нагруженные зоны, что особенно важно при увеличении удельных нагрузок и использовании современных облегченных стеновых изделий.

Проведенные теоретические исследования подтвердили возможность использования

современных программных расчетных комплексов для анализа напряженно-деформированного состояния каменных конструкций, изготовленных не только из традиционных стеновых материалов, но и из высокопустотных керамических камней типа Poricam.

Расчеты показали, что выпускаемые отечественными заводами-производителями высокопустотные стеновые изделия можно применять в несущих наружных и внутренних стенах не только в малоэтажном строительстве, но и для зданий повышенной этажности (9-12 этажей).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гагарин В.Г., Дмитриев К.А.** Учет теплотехнических неоднородностей при оценке теплозащиты ограждающих конструкций в России и европейских странах // *Строительные материалы*, №3, 2013, с. 14-16.
2. **Бедов А.И., Бабков В.В., Габитов А.И., Гайсин А.М., Резвов О.А., Кузнецов Д.В., Гафурова Э.А., Синицин Д.А.** Конструктивные решения и особенности расчета теплозащиты наружных стен зданий на основе автоклавных газобетонных блоков // *Вестник МГСУ*, №2, 2012, с. 98-103.
3. **Гайсин А.М., Бабков В.В.** Анализ несущих наружных стен многоэтажных жилых домов в Республике Башкортостан с позиции удельной теплозащитной характеристики // *Строительные материалы*, №10, 2016, с. 55-58.
4. **Бедов А.И., Бабков В.В., Гайсин А.М., Габитов А.И.** Опыт эксплуатации жилых и гражданских зданий с теплоэффективными наружными стенами в климатических условиях Республики Башкортостан // *Вестник МГСУ*, №2, Том 1, 2011, с. 89-94.
5. **Бедов А.И., Гайсин А.М., Габитов А.И., Кузнецов Д.В., Салов А.С., Абдулатипова Е.М.** Сравнительная оценка методов определения физико-механических характеристик высокопустотных керамических изделий на основе современных программных комплексов // *Вестник МГСУ*, Том 12, Вып. 1 (100), 2017, с. 17-25.
6. **Ищук М.К.** Отечественный опыт возведения зданий с наружными стенами из облегченной кладки. М.: Изд-во РИФ «Стройматериалы», 2009. 354 с.
7. **Онищик Л.И.** Каменные конструкции промышленных и гражданских зданий. – М.: Стройиздат, 1939. – 208 с
8. **Рохлин И.А.** Расчет керамических конструкций. – Киев: Госстройиздат УССР, 1956. – 289 с.
9. **Соколов Б.С.** Физическая модель разрушения каменных кладок при сжатии. // *Известия вузов. Строительство*, 2002, №9, с. 4-9.
10. **Донченко О.М., Дегтев И.А.** К развитию теории трещиностойкости и сопротивления кладки при сжатии // *Известия вузов. Строительство*, №10, 2000, с. 16-20.
11. **Пангаев В.В., Албаут Г.Н., Федоров А.В., Табанюхова М.В.** Модельные исследования напряженно-деформированного состояния каменной кладки при сжатии. // *Известия высших учебных заведений: научно-теоретический журнал. Строительство*, №2, 2003, с. 24-29.
12. **Карпиловский В.С., Криксунов Э.З., Маляренко А.А., Микитаренко М.А., Перельмутер А.В.** Вычислительный комплекс SCAD. – М.: СКАД-СОФТ, 2013. – 656 с.

Бедов Анатолий Иванович, кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры железобетонных и каменных конструкций, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет; 129337, Россия, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, к. 417; тел. (8499)287-49-19, доб. 30-36; E-mail: gbk@mgsu.ru;

Габитов Азат Исмагилович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительных конструкций, Уфимский государственный нефтяной технический университет; Россия, г. Уфа, ул. Менделеева, д. 195, к. 225; тел. (8347) 228-22-00; E-mail: azat7@ufanet.ru.

Галлямов Азат Абузарович, кандидат экономических, доцент кафедры математики, Уфимский государственный нефтяной технический университет; Россия, г. Уфа, ул. Менделеева, д. 195, к. 319; тел. (8347) 242-87-15; E-mail: dmpraise@gmail.com.

Салов Александр Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильных дорог и технологии строительного производства, Уфимский государственный нефтяной технический университет; Россия, г. Уфа, ул. Менделеева, д. 195, к. 319; тел. (8347) 228-22-00; E-mail: salov@list.ru.

Гайсин Аскар Миниярович, кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций, Уфимский государственный нефтяной технический университет; г. Уфа, ул. Менделеева, д. 195, к. 225; тел. (8347) 228-22-00.

Anatoliy I. Bedov, Candidate of Technical Sciences, Professor, Department of Concrete and Reinforced Concrete Structures, National Research Moscow State University of Civil Engineering; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; phone +7 (499) 287-49-19, ext. 30-36; E-mail: gbk@mgsu.ru.

Azat I. Gabitov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Building Structures, Ufa State Petroleum Technological University; Office 225, 195 Mendeleeva St., Ufa, 450062, Russian Federation; phone +7 (347) 228-22-00; E-mail: azat7@ufanet.ru.

Azat A. Gallyamov, Candidate of Economics Sciences, Lecturer, Department of Math, Ufa State Petroleum Technological University; Office 225, 195 Mendeleeva St., Ufa, 450062, Russian Federation; phone +7 (347) 242-87-15; E-mail: dmpraise@gmail.com.

Aleksandr S. Salov, Candidate of Technical Sciences, Lecturer, Department "Highways and Technology of Construction Production", Ufa State Petroleum Technological University; Office 319, 195 Mendeleeva St., Ufa, 450062, Russian Federation; phone +7 (347) 228-22-00; E-mail: salov@list.ru.

Askar M. Gaisin, Candidate of Technical Sciences, Lecturer, Department of Building Structures, Ufa State Petroleum Technological University; Office 225, 195 Mendeleeva St., Ufa, 450062, Russian Federation; phone +7 (347) 228-22-00.