

DOI: 10.12737/article_5a27cb7fa42cc1.15814822

Донченко О.М., канд. техн. наук, проф.,
Дегтев И.А., канд. техн. наук, проф.,
Тарасенко В.Н., канд. техн. наук, доц.,
Литовкин Н.И., инж.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА И ВЕЛИЧИНА КОНТАКТНОЙ ДЕФОРМАЦИИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ РАСТВОРНЫХ ШВОВ КАМЕННОЙ КЛАДКИ ПРИ СИЛОВОМ СЖАТИИ*

vell.30@mail.ru

При проектировании гражданских зданий из камня возникает необходимость проведения конструктивных расчетов не только на прочность многоэтажных многослойных и разнонагруженных стен, но и по деформациям. Показана зависимость контактной деформации цементных растворов горизонтальных швов каменной кладки при силовом сжатии от действующего напряжения, прочности и жесткости раствора.

Ключевые слова: каменная кладка, строительный раствор, горизонтальные швы, контактная деформация, предельный коэффициент пластичности.

Введение. Для строительства гражданских многоэтажных зданий России последних десятилетий характерно большое многообразие конструктивных решений и материалов каменной кладки их наружных стен. Сейчас кладка несущих и самонесущих многоэтажных наружных стен устраивается не только из керамического и силикатного кирпича, но и из легких мелких пустотных керамзитобетонных и сплошных ячеисто-бетонных камней с внутренними утепляющими слоями и наружной облицовкой керамическими плитками или облицовочными камнями. При проектировании и строительстве зданий со стенами из совершенно различных по деформативно – прочностным свойствам материалов для обеспечения их надежности деформативность имеет не менее важное значение, чем прочность. Имеющийся негативный опыт строительства и эксплуатации многоэтажных зданий с наружной облицовкой керамическими плитками, которые со временем отслаиваются и опадают, растрескивания и повреждения соединений разнонагруженных и разновысоких стен предопределяют настоятельную необходимость выполнения тщательных и точных расчетов деформирования их кладки.

Актуальность этой проблемы обусловлена тем обстоятельством, что нормативная методика [1] определения деформаций каменной кладки, разработанная проф. Л.И. Онищиком [2] еще в 30-х годах прошлого века, когда не было такого разнообразия каменных материалов и растворов, дающая только интегральную оценку относительным деформациям кладки и не учитывающая особенности деформативно-прочностных свойств современных разнообразных строительных материалов и конструктивных решений,

несовершенна. Определенные по этой методике деформации каменной кладки из камней совершенно различной прочности и деформативности, на растворах невысокой и высокой прочности совершенно одинаковы, что не подтверждается в экспериментах.

Методология. В отсутствие физически достоверной деформационной теории каменной кладки многие исследователи и проектировщики теоретически определяют абсолютные деформации кладки стен многоэтажных зданий как сумму абсолютных деформаций составляющих её материалов – камня и раствора. По их данным, относительные деформации сжатия кладки из различных материалов часто оказываются примерно равными, что в общем несколько согласуется с нормативной методикой [1].

Этот эффект заключается в двойственном характере деформаций раствора горизонтальных швов кладки. Многие исследователи каменной кладки по результатам опытов сходятся во мнении, что деформации раствора здесь состоят из обычных деформаций самого существа раствора и трудно устанавливаемых деформаций его контактной зоны с камнем. По их расчетам, контактная деформация в кладке является преобладающей и в 7–8 раз больше деформаций собственно раствора, и в 5–6 раз больше деформаций камня.

Так, проф. С.А. Семенов [3] в результате опытов с кладкой из глиняного кирпича высотой 65 мм марки М150 на растворе прочностью 22 кг/см² с толщиной горизонтальных швов 12 мм на базе 100 см экспериментально-теоретически установил, что абсолютная деформация 13 рядов кирпича, равная 0,4 мм, составляет всего лишь 15 % общей деформации кладки при напря-

жениях $29,0 \text{ кг/см}^2$, равных 90 % от разрушающих. Абсолютные деформации раствора 12 швов были ещё меньшими – 0,3 мм, составлявшие всего лишь 10 %. Тогда на долю контактных деформаций этих швов приходилось 75 % от общих.

Аналогичные оценки величины контактных деформаций горизонтальных растворных швов приведены в работах С.В. Полякова [4] и других исследователей, испытывавших кладку с керамическим и силикатным кирпичом высотой 88 мм. По их мнению, контактные деформации раствора горизонтальных швов обычно составляют 75–80 % от общих деформаций кладки.

Основная часть. Проведенные авторами многолетние исследования [5–7] тоже подтвердили значительную величину контактных деформаций горизонтальных растворных швов, но установили ее несколько меньшей, чем в работах [3, 4] и равной от 50 % до 80 % от общих деформаций кладки. Также очень трудно было установить точную величину деформации собственно раствора. Поэтому авторы теоретически определяли абсолютную величину контактной деформации, но более точно устанавливали величины абсолютных деформаций камня и раствора, чем в работах других исследователей.

В своих исследованиях авторы основывались не на номинальных нормативных значениях начальных модулей деформации материалов E_0 , а на действительных их сниженных значениях, соответствующих уровню нагружения и исчерпанию сопротивления кладки при осевом сжатии.

Определение значений средних (секущих) модулей деформации материалов E' представляет тоже сложную задачу. Как известно, напряженно-деформативное состояние (НДС) камня и раствора сжатой кладки имеет диаметрально противоположный характер. Камень сжимается вертикальной нагрузкой и синхронно неравномерно растягивается в поперечных направлениях более деформативным раствором, вследствие чего его начальный модуль деформации E_0 с нагружением снижается. Раствор, наоборот, неравномерно, но тоже синхронно сжимается во всех направлениях и у него связь между напряжениями σ и деформациями ε явно нелинейна и существенно отличается от деформаций раствора при сжатии в стандартных образцах, и до сих пор недостаточно изучена.

В отсутствие физически обоснованной деформационной теории каменной кладки величину среднего секущего модуля деформаций кирпича можно описать зависимостью

$$E'_k = E_k^0 \left(1 - \frac{\lambda_k \theta_k \sigma}{R_k} \right), \quad (1)$$

где σ – действующее напряжение в кладке; E_k^0 , R_k , θ_k и λ_k – соответственно, начальный модуль деформации, прочность на сжатие, поправочный коэффициент на сложность НДС, равный 1,5 и предельный коэффициент пластичности кирпича, определяемый из зависимости (2), предложенной авторами

$$\lambda_k = \frac{1}{2,5 + aR_k} \quad (2)$$

где a – для керамического кирпича составляет 0,05; для силикатного – 0,025.

По результатам многолетних исследований [5–7] зависимость среднего модуля деформации E'_p цементных растворов в горизонтальных швах каменной кладки от действующих в ней напряжений сжатия σ является нелинейной и имеет вид

$$E'_p = E_p^0 [1 - \lambda_p \cdot \theta_p (\sigma/R_p)^2], \quad (3)$$

где E_p^0 – начальный модуль деформации; R_p – прочность на сжатие; θ_p – поправочный коэффициент при сложном пространственном состоянии, равный 0,5; λ_p – предельный коэффициент пластичности раствора, который рассчитывают из зависимости (4)

$$\lambda_p = \frac{1}{1,10 + 0,003 \cdot R_p}. \quad (4)$$

В соответствие с зависимостью (4) коэффициент λ_p для цементных растворов марок М25, М50 и М200, соответственно, равен 0,85; 0,80 и 0,59. Коэффициенты предельной пластичности материалов были получены по результатам опытов на основании энергетических принципов, как отношение работы, затраченной на пластическое деформирование, к общей работе, пошедшей на их разрушение при центральном сжатии.

Что же касается величины контактной деформации, то в настоящее время точно установить ее в опытах современными приборами практически невозможно. Это не упругопластическая, а чисто пластическая местная деформация бугристой зоны раствора, соприкасающегося снизу и сверху с частью шершавой поверхности кирпича или камня. Естественно, деформации этих отдельных мелких значительно более нагруженных участков раствора, получивших ещё в начале нагружения из-за обезвоживания камнем существенно более низкую по сравнению с расчетом (практически вдвое) плотность, прочность и начальный модуль деформации, оказываются в несколько раз больше величин стандартных деформаций самого раствора горизонтальных швов.

Учитывая сложность рассматриваемой проблемы, в лабораториях в течение длительного

времени не прекращаются исследования НДС растворной постели на всех стадиях работы кладки – от её создания до исчерпания сопротивления при силовом сжатии. В результате установлены следующие общие и уже не дискуссионные внешние и внутренние структурные отличительные особенности ее раствора:

- резкая структурная неоднородность по всей площади кирпича;
- отсутствие на отдельных значительных участках кирпича тесного соприкосновения и соответственно стабильного контакта (сцепления и адгезии) с раствором;
- наличие на некоторых протяженных участках кирпича в контактной поверхности раствора явно наблюдаемых протяженных пустот.

Действительно, проведенные исследования и рентгенограммы свидетельствуют, что по длине и ширине растворной постели даже в пределах одного кирпича плотность раствора изменяется в широких пределах – от 1,5 до 2,0–2,25 раз. Естественно, что точно также должна изменяться его плотность, прочность и начальный модуль деформации, а, следовательно, и жесткость, деформации и осадка раствора.

И если физика этих явлений очевидна и хорошо понятна, то установление действительных значений НДС камня и раствора на всех стадиях работы кладки аналитическими зависимостями детерминированных законов в связи с многочисленностью различных причин изгиба и растяжения камня в кладке, имеющих случайный (стохастический) характер, практически невозможно, и они могут быть определены только вероятностными методами.

Но для разработки достоверных вероятностных методов расчета деформаций каменной кладки, в том числе и контактных, при силовом кратковременном сжатии можно более точно определять по разработанному авторами инженерному методу, основанному на единичных методологических подходах. Для этого следует рассматривать в первую очередь не расчетный большой объем кладки целиком и его относительные деформации, а перейти к определению абсолютных деформаций отдельных рядов камня и раствора проектируемой кладки, а потом уже суммировать их результаты для всей высоты каменной конструкции. Для этого необходимо по ранее разработанной нами методике определять абсолютные деформации отдельно камня и раствора одного ряда кладки и суммировать их с абсолютными значениями контактных деформаций, установленных нами на основании обработки результатов многочисленных экспериментальных исследований кладки с камнями и растворами различных видов, прочности и деформативности.

Для установления качественного соответствия и количественной оценки степени точности разработанного теоретического решения и аналитических зависимостей были проведены соответствующие машинные вычисления (численные эксперименты) абсолютных деформаций многочисленных образцов кратковременно центральной сжатой кладки в широком диапазоне изменений прочности кирпича (от М75 до М300) и раствора (от М25 и до М200) в сопоставлении с данными опытов различных исследований [3–7]. В результате было установлено, что разработанное теоретическое решение дает качественно и количественно более правильные и точные результаты, чем нормативная методика [1].

Так, величина абсолютной контактной деформации горизонтальных растворных швов $\Delta l_{\text{кон}}$ высотой 12–15 мм каменной кладки при кратковременном центральном силовом сжатии из кирпича высотой 65–88 мм на базе в 100 см колеблется от 1,2 до 4,2 мм, увеличиваясь с повышением прочности кладки, соответственно, от 22 до 78 кг/см². Показано, что она существенно повышается с повышением прочности кирпича (от марки М75 до М300).

По отношению к общей абсолютной деформации кладки $\Delta l_{\text{об}}$ такой же высоты величина абсолютной контактной деформации горизонтальных растворных швов $\Delta l_{\text{кон}}$ колеблется в пределах от 50 % для низкопрочной кладки с $R = 22$ кг/см² до 80 кг/см². Для кладки с кирпичом равной прочности, но на растворах различной прочности, она на 8–10 % увеличивается с понижением прочности раствора.

При пересчете на один горизонтальный растворный шов при исчерпании сопротивления кладки величина абсолютной контактной деформации $\Delta l_{\text{кон}}$ составляет от 0,1 мм для кладки прочностью 22 кг/см², до 0,33 мм для кладки прочностью $R = 78$ кг/см², а ее процентное отношение к общей абсолютной деформации $\Delta l_{\text{об}}$ кладки сохраняется.

Величина относительной общей деформации кладки $\varepsilon_{\text{об}}$ на растворах различной прочности – от М25 до М200 не однозначна, как это принято в действующих нормах [1], и увеличивается с повышением прочности кладки, кирпича и раствора от 0,00212 для кладки на растворе М25 с кирпичом М75 до 0,0055 для кладки с кирпичом М300 на растворе М200, что существенно отличается с нормативной методикой [1] и зависимостью проф. Л.И. Онищика, у которых для кладки из всех этих марок кирпича и растворов величина относительной общей деформации сохраняет постоянную величину 0,00264.

Принимая такую величину полученной абсолютной контактной деформации как среднюю

для всех отдельных рядов камня и раствора кладки из любых их видов, мы можем более точно определять деформации каменных конструкций.

Для понимания значимости и величины контактной деформации не менее важным является характер и процесс возникновения и динамики ее развития. Физически представляется, что возникновение контактной деформации происходит задолго до напряжения кладки расчетной нагрузкой. Первые контактные деформации возникают сразу же при укладке кирпича на шероховатую поверхность раствора. Хотя эти деформации могут быть весьма незначительными, но значение их в действительности весьма велико, поскольку через отдельные небольшие площади точки контакта осуществляется интенсивный водообмен соприкасающихся материалов. Именно здесь, в объеме раствора этих точек касания происходят первые фазы развития неоднородности структуры раствора и существенное снижение его плотности, прочности и жесткости. И степень такого снижения, доходящая часто даже до двукратной и более, зависит от ряда сложных факторов: местной всасывающей способности кирпича и водоудерживающей способности раствора.

Процесс возникновения и развития контактной прослойки раствора происходит следующим образом. При устройстве кладки между поверхностями кирпича и раствора образуются полости, заполненные водой. При твердении раствора происходит отсасывание и испарение воды, а полости заполняются воздухом. При этом действительное соприкосновение горизонтальных плоскостей кирпича и растворного шва происходит только на части их общей площади (рис. 1, 3). Напряжения, возникающие вначале под воздействием собственного веса материалов, а затем и от возрастающей нагрузки распределяются неравномерно и в продольном, и в поперечном направлениях элементов.

При нагружении и выдерживании под нагрузкой места контактов раствора деформируются (рис. 1, 4). Увеличивается площадь соприкосновения поверхностей кирпича и раствора, приводящая к более равномерному распределению напряжений и деформаций по площади кирпича и раствора.

Аналогичная картина повторяется вторично после укладки на шероховатую поверхность кирпича нового слоя бугристого раствора. Аналитически точно определить эти деформации невозможно, поскольку свежий раствор не имеет прочности и жесткости и не в состоянии сопротивляться даже небольшой механической нагрузке от веса одного ряда кирпича, составляющей порядка $0,0158 \text{ кг/см}^2$. Раствор, просто обжимаясь,

разглаживается и растекается от бугристых точек контакта с кирпичом в более низкие участки смеси. И так может продолжаться в течении двух-трех суток, пока раствор не наберет минимальную 20–35 % прочность. Тогда у раствора появляется минимальная жесткость и модуль деформации и можно говорить о конкретной величине его контактной деформации.

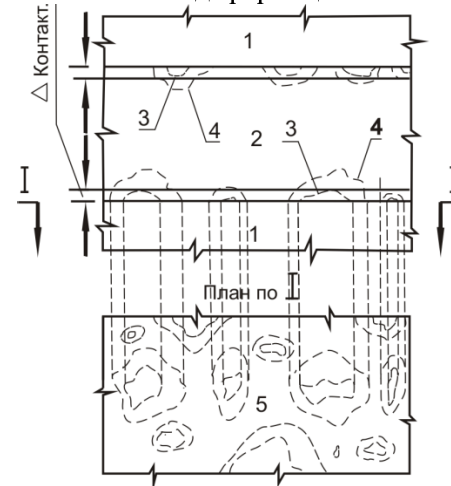


Рис. 1. Схема контактных зон раствора и кирпича: 1 – кирпич; 2 – раствор; 3 – поверхность контакта до нагружения кладки; 4 – поверхность контакта после нагружения кладки; 5 – поверхность кирпича

Определенно судить о величине этой первой фазы контактной деформации весьма затруднительно, поскольку измерение ее чрезвычайно сложно. И только по уменьшению толщины пустотных пазух между камнем и раствором или высоты горизонтального растворного шва можно определить ее порядок и величину. В первом приближении можно считать, что первая фаза контактной деформации находится в пределах $0,015–0,025 \text{ мм}$ и в среднем может быть принята равной для одного растворного шва $0,02 \text{ мм}$. Естественно, что для каждой стороны шва величина абсолютной контактной деформации будет вдвое меньше.

Но эту начальную фазу контактной деформации раствора нельзя смешивать со второй ее основной фазой общей расчетной деформации. И хотя она физически происходит путем дополнительного обмятия бугристых поверхностей непрочных обезвоженных участков раствора, но здесь местная сосредоточенная нагрузка на порядок выше и больше объема окружающего раствора, вовлекаемого в совместную работу. Поэтому последующее развитие контактной деформации раствора с повышением нагрузки вначале существенно увеличивается с постепенным замедлением, смыканием и закрытием пустот и щелей между камнем и раствором.

В целом, по результатам исследований, контактная деформация цементных растворов горизонтальных швов каменной кладки при силовом

кратковременном центральном сжатии зависит от действующего напряжения, прочности и жесткости раствора и может быть для каждого шва определяться по нашей несложной зависимости

$$\Delta l_{\text{кон}} = k \cdot h_p \cdot \sigma \cdot (\sigma/R_p)^{0,5}, \quad (5)$$

где h_p – высота растворного шва; σ – напряжение в кладке; k – постоянный коэффициент контактной деформации раствора при напряжении в кладке $1,0 \text{ кг/см}^2$, равный по найденной нами зависимости

$$k = 0,0002 + 1/(\gamma \cdot M_p). \quad (6)$$

В зависимости (6) коэффициент γ отражает относительную величину снижения начального модуля деформации раствора в предельном состоянии кладки.

Структура зависимостей (5, 6) качественно и количественно хорошо отражает установленное нами в опытах влияние увеличения прочности камня и раствора на снижение величины абсолютной контактной деформации горизонтального растворного шва при кратковременном силовом нагружении кладки осевым сжатием. Это объясняется хорошо известными явлениями того, что с повышением прочности кирпича увеличивается мелкозернистость, уменьшаются его пористость, влагопотребление и отсос влаги из раствора. Также растворы повышенной и высокой прочности обычно соответствуют смесям с небольшим водотвердым отношением, способствующим их влагоудержанию. Все это, естественно, противодействует снижению плотности, прочности и жесткости раствора и увеличению его деформации.

В качестве иллюстрации результатов полученных решений приведем величины абсолютной контактной деформации горизонтального растворного шва для трех видов каменной кладки с кирпичом различной прочности на растворе единой прочности марки М25:

1. Кирпич М 100, $R_{\text{кл}} = 26 \text{ кг/см}^2$, $\Delta l_{\text{кон}} = 0,02 + 0,13 = 0,15 \text{ мм}$;

2. Кирпич М 200, $R_{\text{кл}} = 36 \text{ кг/см}^2$, $\Delta l_{\text{кон}} = 0,02 + 0,21 = 0,23 \text{ мм}$;

3. Кирпич М 300, $R_{\text{кл}} = 50 \text{ кг/см}^2$, $\Delta l_{\text{кон}} = 0,02 + 0,35 = 0,37 \text{ мм}$.

В тоже время, при применении раствора более высокой прочности (марки М200) величина абсолютной контактной деформации одного горизонтального растворного шва кладки с кирпичом марки М 300 при ее прочности $R_{\text{кл}} = 78 \text{ кг/см}^2$ снижается до $\Delta l_{\text{кон}} = 0,02 + 0,14 = 0,16 \text{ мм}$.

Выводы. Имея, таким образом, величину контактных деформаций, теперь возможно более точно определять абсолютные и относительные деформации кладки стен многоэтажных зданий. Для этого к правильно определенным деформациям многочисленных рядов камня и раствора необходимо добавлять соответствующие величины двух фаз контактных деформаций горизонтальных растворных швов, т.е. возникающих во время возведения кладки и при ее проектном нагружении.

Все вышеизложенное позволит более точно определять не только деформации многослойных стен многоэтажных зданий, но и, в первую очередь, рассчитывать разность абсолютных деформаций разновысоких и разнонагруженных стен, стен с жесткими элементами облицовки и т.п. для предотвращения их растрескивания и повреждения.

**Работа выполнена в рамках Программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова.*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК:

1. СНиП П-22-81* Каменные и армокаменные конструкции // Госстрой России. М.: ФГУП ЦПП, 2004.
2. Онищик Л.И. Прочность и устойчивость каменных конструкций. М.: ОНТИ, 1937. 291 с.
3. Семенцов С.А. Некоторые вопросы прочности и проектирования крупнопанельных и каменных конструкций: доклад по опубл. работам на соискание учен. степени д-ра техн. наук. М.: Центр. науч.-исслед. ин-т строит. конструкций им. В. А. Кучеренко, 1969. 7 с.
4. Поляков С.В. Длительное сжатие кирпичной кладки. М.: Госстройиздат, 1959. 183 с.
5. Дегтев И.А., Донченко О.М. Экспериментальные исследования деформирования и сопротивления кладки из силикатного кирпича на различных растворах при центральном сжатии // В сб.: Строительные конструкции и инженерные сооружения. Сборник трудов МИСИ, БТИСМ. М.: МИСИ, 1982. С. 3–10.
6. Донченко О.М., Дегтев И.А. К развитию теории трещиностойкости и сопротивления кладки при сжатии // Известия ВУЗов. Строительство и архитектура. 2000. № 8. С. 16–20.
7. Донченко О.М., Пашенко Ж.Н. Прочность и трещиностойкость кладки из пустотелых керамзитобетонных камней при центральном сжатии // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2013. № 6. С. 79–86.

Информация об авторах

Донченко Олег Михайлович, кандидат технических наук, профессор кафедры строительства и городского хозяйства.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.
Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Дегтев Илья Алексеевич, кандидат технических наук, профессор кафедры архитектурных конструкций.

E-mail: konstnarh@mail.ru

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.
Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Тарасенко Виктория Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры архитектурных конструкций.

E-mail: vell.30@mail.ru

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.
Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Литовкин Николай Иванович, инженер кафедры строительства и городского хозяйства.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.
Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила в октябре 2017 г.

© Донченко О.М., Дегтев И.А., Тарасенко В.Н., Литовкин Н.И., 2017

Donchenko O.M., Degtev I.A., Tarasenko V.N., Litovkin N.I.

**THE PHYSICAL NATURE AND THE MAGNITUDE OF THE CONTACT DEFORMATION
OF THE HORIZONTAL MORTAR JOINTS OF MASONRY WHEN POWER COMPRESSION**

In the design of civil buildings of stone arises the need for structural calculations not only on the strength of multi-storey multi-layered walls, but also on the deformations. The dependence of the contact deformation of cement mortar of the horizontal joints of masonry under compression force from the effective stress, strength and stiffness solution.

Keywords: masonry, mortar, horizontal seams, pin deformation, limiting plasticity.

Information about the authors

Donchenko Oleg Mihailovich, PhD, Professor.

E-mail: kafedrasigsh@mail.ru

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.
Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Degtev Ilya Alekseevich, PhD, Professor.

E-mail: konstnarh@mail.ru

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.
Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Tarasenko Viktoriya Nikolaevna, PhD, Assistant professor.

E-mail: vell.30@mail.ru

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.
Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Litovkin Nikolay Ivanovich, engineer.

E-mail: kafedrasigsh@mail.ru

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.
Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received in October 2017

© Donchenko O.M., Degtev I.A., Tarasenko V.N., Litovkin N.I., 2017