

## ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАМЕННОЙ КЛАДКИ ИЗ КЕРАМИЧЕСКИХ ПОРИЗОВАННЫХ БЛОКОВ

В. Н. Деркач

Д. т. н., доцент, профессор кафедры строительных конструкций УО «Брестский государственный технический университет»,  
директор филиала РУП «Институт БелНИИС» – Научно-технический центр, Брест, Беларусь, e-mail: v-derkach@yandex.by

### Реферат

В статье приведены результаты экспериментальных исследований деформационных характеристик каменных кладок из поризованных керамических блоков с пазогребневым соединением вертикальных швов. Исследования модуля упругости и модуля сдвига выполнялись на образцах каменной кладки, вертикальные швы которой были выполнены без заполнения и с заполнением раствором. Установлено, что отношение модуля сдвига к модулю упругости исследованных каменных кладок ниже значения, приведенного в нормах по проектированию каменных конструкций. Заполнении клеевым раствором вертикальных швов каменной кладки приводит к возрастанию модуля сдвига. Указано на необходимость корректировки положения нормативных документов, касающиеся деформационных характеристик каменных кладок из поризованных керамических блоков.

**Ключевые слова:** каменная кладка, керамические поризованные блоки, модуль сдвига, модуль упругости.

## DEFORMATION CHARACTERISTICS OF MASONRY MADE OF CERAMIC POROUS BLOCKS

V. N. Derkach

### Abstract

The article presents the results of experimental studies of the deformation characteristics of masonry made of porous ceramic blocks with groove connection system of vertical joints. Studies of the elastic modulus and shear modulus were carried out on specimens of masonry, the vertical joints of which were made without filling and with filling with mortar. It is established that the ratio of the shear modulus to the modulus of elasticity of the studied masonry is lower than the value given in the design codes of masonry structures. Filling the vertical joints of masonry with mortar leads to an increase in the shear modulus. It is indicated that it is necessary to adjust the provisions of the design codes concerning the deformation characteristics of masonry made of porous ceramic blocks.

**Keywords:** masonry, porous ceramic blocks, shear modulus, elastic modulus.

### Введение

В инженерных расчетах каменная кладка обычно рассматривается как изотропный материал, модуль сдвига которого определяется по зависимости (1):

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}, \quad (1)$$

где  $E$  – модуль упругости каменной кладки;  
 $\nu$  – коэффициент поперечной деформации.

Еврокод 6, а также отечественные нормы СП 5.01.02, устанавливающие требования к проектированию каменных и армокаменных конструкций, допускают принимать модуль сдвига  $G$ , равным 40 % кратковременного модуля упругости  $E$ . Последний определяют путем испытания образцов каменной на сжатии согласно стандарту СТБ EN 1052-1.

Кратковременный модуль упругости неармированной каменной кладки  $E$  является секущим модулем, его величина равна тангенсу угла наклона прямой, проходящей через точки диаграммы деформирования кладки, соответствующие ординатам  $\sigma = 0$  и  $\sigma = 0,33f$  ( $f$  – прочность на сжатие каменной кладки).

При отсутствии результатов испытаний кратковременный модуль упругости  $E$  каменной кладки при расчете каменных конструкций допускается определять умножением значения характеристической прочности на сжатие  $f_k$  на коэффициент  $K_E$ , принимаемый равным:

- для кладки, выполненной на кладочном растворе, прочностью на сжатие  $f_m \geq 5$  МПа (за исключением кладки из кладочных изделий из автоклавного ячеистого бетона) –  $K_E = 1000$ ;
- для кладки из кладочных изделий из автоклавного ячеистого бетона, а также кладки из других видов кладочных изделий на кладочном растворе прочностью на сжатие  $f_m < 5$  МПа –  $K_E = 600$ .

Необходимо иметь в виду, что оценка модуля упругости каменной кладки по ее прочности на сжатие, без учета вида растворных

швов и качества выполнения каменной кладки, может приводить к значительным погрешностям.

В последнее время при возведении стенового ограждения широкое распространение получили каменные кладки из керамических поризованных блоков с профилированными боковыми гранями, образующими при возведении каменной кладки стыковое соединение «паз-гребень». При возведении таких кладок кладочным раствором заполняют только горизонтальные швы кладки, что существенно повышает производительность труда и снижает расход материалов. Известно, что отсутствие кладочного раствора в вертикальных швах кладки снижает ее прочность на сдвиг и растяжение, а также отражается на деформационных характеристиках кладки при сдвиге [1–5]. При этом нормы по проектированию каменных и армокаменных конструкций при определении модуля сдвига не делают различия между кладками с «сухими» пазогребневыми стыковыми соединениями кладочных изделий и кладками с вертикальными швами, заполненными кладочным раствором. Указанное обстоятельство определило необходимость проведения настоящих исследований.

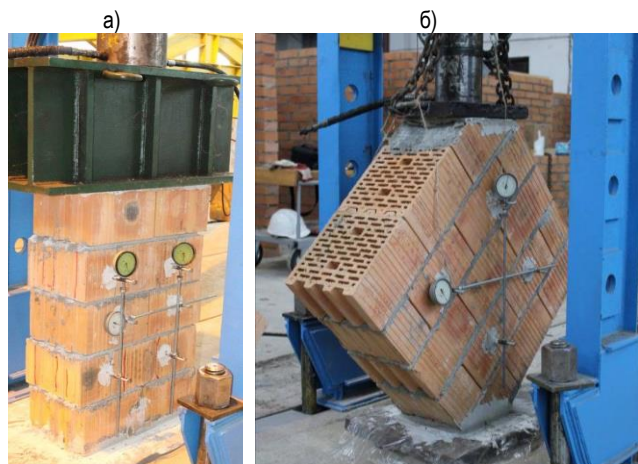
### Методика экспериментальных исследований

С целью определения кратковременного модуля упругости  $E$  и модуля сдвига  $G$  были изготовлены и испытаны три серии опытных образцов каменной кладки из поризованных пустотелых пазогребневых керамических блоков размерами 250x250x138 мм на стандартных растворных швах.

Серия С-1 включала четыре образца каменной кладки, которые испытывались на сжатие перпендикулярно плоскости горизонтальных растворных швов, согласно СТБ EN 1052-1, а серии ДС-1 и ДС-2 по три образца, испытываемых на диагональное сжатие в соответствии с RILEM TC [6]. Образцы серии С-1 и ДС-1 изготавливались со стыковым соединением керамических блоков «паз-гребень» без заполнения вертикальных швов раствором. В образцах серии ДС-2 стыковые соединения блоков были заполнены клеевым раствором для тонкослойных швов каменной кладки. Установленное в соответствии с СТБ EN 772-1 нормализованное значение прочности на сжатие

керамических блоков составило 13,0 МПа, а среднее значение прочности на сжатие затвердевшего кладочного раствора согласно СТБ EN 1015-11 – 15,3 МПа. После изготовления к каждому испытываемому образцу прикладывали предварительную вертикальную равномерно распределенную сжимающую нагрузку таким образом, чтобы сжимающие напряжения в сечении образца составляли около  $2,5 \cdot 10^{-3}$  МПа. В нагруженном состоянии укрытые полиэтиленовой пленкой образцы хранились до испытания в течении 28 суток при температуре +15...20 °С и влажности воздуха 60...70 %.

Общий вид опытных образцов каменной кладки с установленными измерительными приборами показан на рисунке 1.



а) испытание на сжатие перпендикулярно плоскости горизонтальных швов;  
б) испытание на диагональное сжатие

**Рисунок 1** – Общий вид опытных образцов каменной кладки

Образцы, приведенные на рисунке 1а, испытывались осевой сжимающей нагрузкой, действующей перпендикулярно направлению горизонтальных растворных швов, и доводились до разрушения.

Прочность на сжатие отдельного испытываемого образца рассчитывалась по формуле (5):

$$f_{obs,i} = \frac{F_{i,max}}{A_i}, \quad (2)$$

где  $F_{i,max}$  – максимальная нагрузка воспринимаемая образцом каменной кладки;

$A_i$  – площадь поперечного сечения образца.

Кратковременный модуль упругости  $E_i$  определялся по формуле (3) как секущий модуль при среднем значении относительной деформации  $\varepsilon_i$ , измеренной в двух точках и нагрузке, равной одной трети разрушающей нагрузки  $F_{i,max}$ .

$$E_i = \frac{F_{i,max}}{3\varepsilon_{yi} A_i}, \quad (3)$$

где  $F_{i,max}$  – максимальная нагрузка, воспринимаемая образцом каменной кладки;

$A_i$  – площадь поперечного сечения образца;

$\varepsilon_{yi}$  – относительные продольные деформации.

Модуль сдвига  $G$  определялся на образцах кладки, подвергнутых сжатию сосредоточенной силой, приложенной под углом  $45^\circ$  к горизонтальным растворным швам (рисунок 1б). На основании испытаний определялись разрушающие касательные напряжения  $\tau_s$  (МПа) по формуле (4):

$$\tau_s = \frac{0,707P}{A_s}, \quad (4)$$

где  $P$  – разрушающая нагрузка (Н);

$A_s$  – площадь образца (мм<sup>2</sup>), определяемая по формуле (5):

$$A_s = \left( \frac{w+h}{2} \right) \cdot t \cdot n, \quad (5)$$

где  $w$  – ширина образца (мм),

$h$  – высота образца (мм),

$t$  – суммарная толщина образца (мм),

$n$  – коэффициент, учитывающий пустотность кладочных элементов.

Относительные деформации сдвига  $\gamma$  рассчитывались по формуле (6), модуль сдвига  $G$  (МПа) – по формуле (7):

$$\gamma = \frac{\Delta V + \Delta H}{g}, \quad (6)$$

где  $\Delta V$  – деформации сжатия по вертикали (мм);

$\Delta H$  – деформации растяжения по горизонтали (мм);

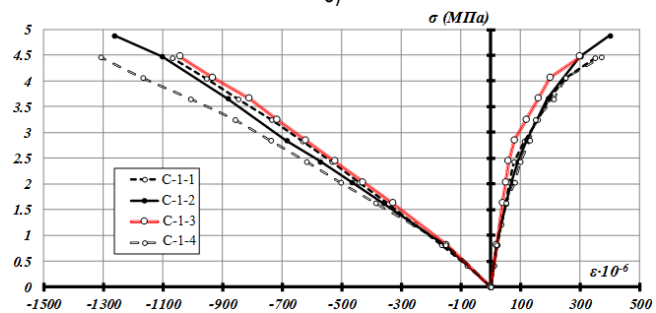
$g$  – расстояние по вертикали между индикаторами перемещений (мм).

$$G = \frac{\tau_s}{\gamma}. \quad (7)$$

### Результаты экспериментальных исследований

При нагружении образцов серии С-1 первые трещины возникали при нагрузках  $F_{crs}$ , составляющих 45–60 % от разрушающей нагрузки  $F_{max}$ . На лицевой поверхности трещины в блоках образовывались в местах их пересечения стыковыми швами. При увеличении нагрузки происходило образование и развитие трещин в вертикальном направлении как на лицевой, так и на боковых гранях образцов. Разрушение образцов каменной кладки происходило хрупко вследствие раздробления керамических блоков.

Характер разрушения и диаграммы деформирования опытных образцов каменной кладки серии С-1 показаны на рисунке 2.



а) характер разрушения опытных образцов;

б) графики зависимости « $\sigma_{obs} - \varepsilon_{obs}$ »

**Рисунок 2** – Результаты испытаний образцов серии С-1

По результатам испытаний среднее характеристическое значение прочности на сжатие каменной кладки  $f_k$  составило 5,3 МПа, а среднее значение кратковременного модуля упругости  $E - 4400$  МПа. Соответственно, экспериментальное значение коэффициента  $K_{E,obs} = E/f_k = 4400/5,3 = 850$ , что несколько ниже значения  $K_E$ , установленного в нормативных документах. Среднее значение коэффициента поперечных деформаций каменной кладки  $\nu_{obs}$  при уровне сжимающих напряжений  $\sigma = 1/3f$  составило 0,14. Согласно действующим нормам по проектированию каменных конструкций при  $G = 0,4E$  значение коэффициента поперечных деформаций должно быть равным 0,25.

Значения деформационных характеристик каменной кладки, полученные по результатам испытаний опытных образцов серии С-1, приведены в таблице 1.

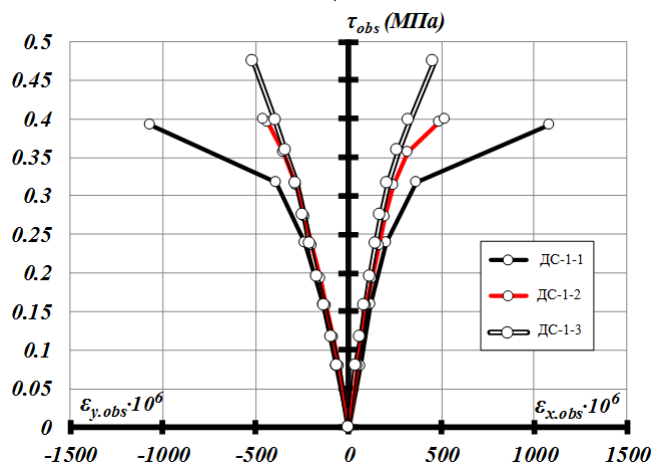
Таблица 1 – Деформационные характеристики каменной кладки образцов серии С-1

№ серии	№ образца	Модуль упругости $E_{obs,i}$ МПа	Коэффициент Пуассона $\nu_{obs,i}$	$K_{E_{obs,i}}$
С-1	С-1-1	4600	0,14	850
	С-1-2	4400	0,15	910
	С-1-3	4700	0,12	830
	С-1-4	4000	0,16	790
<b>Среднее арифметическое</b>		<b>4400</b>	<b>0,14</b>	<b>850</b>

Разрушение образцов каменной кладки серии ДС-1 имело пластический характер и происходило в результате их раскалывания по зигзагообразной траектории, проходящей по вертикальным и горизонтальным швам при значениях касательных напряжений  $\tau_{max} = 0,39-0,47$  МПа. Характер разрушения опытных образцов и графики зависимости «касательные напряжения  $\tau_{obs}$  – относительные деформации в горизонтальном  $\epsilon_{x,obs}$  и вертикальном направлениях  $\epsilon_{y,obs}$ » приведены на рисунке 3.



а)



а) характер разрушения опытных образцов;  
б) графики зависимости « $\tau_{obs} - \epsilon_{obs}$ »

Рисунок 3 – Результаты испытаний образцов серии ДС-1

Анализ диаграмм деформирования каменной кладки (рисунок 3б) показывает, при увеличении касательных напряжений  $\tau_{obs}$  до уровня примерно  $0,7\tau_{max}$  каменная кладка работала практически упруго как в направлении линии действия сжимающей нагрузки, так и в ортогональном к ней направлении. При этом предельные значения угла сдвиговых деформаций  $\gamma_{max}$  составило около 1 мм/м. Среднее значение модуля сдвига  $G_{obs}$  при  $\tau_{obs} = 0,3\tau_{max}$  было равно 620 МПа.

Значения деформационных характеристик каменной кладки, полученные по результатам испытаний опытных образцов серии ДС-1, приведены в таблице 2.

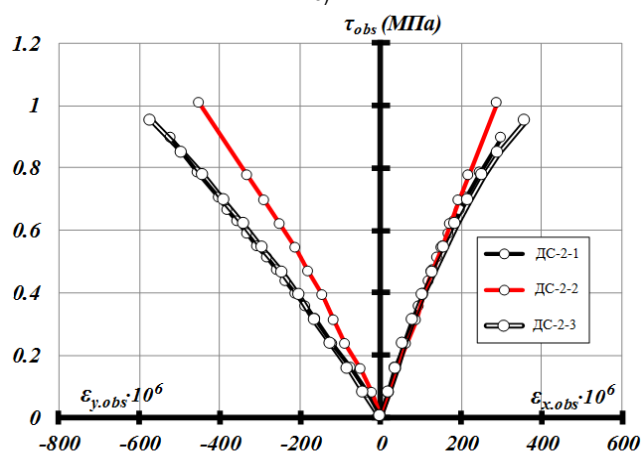
Таблица 2 – Деформационные характеристики каменной кладки образцов серии ДС-2

№ серии	№ образца	Предельные значения угла сдвиговых деформаций, $\gamma_{obs,i}$ (мм/м)	Модуль сдвига при $\tau_{obs}=0,3\tau_{max}$ , $G_{obs,i}$ (МПа)
ДС-1	ДС-1-1	-	543
	ДС-1-2	0,98	650
	ДС-1-2	0,97	656
<b>Среднее арифметическое</b>		<b>0,975</b>	<b>620</b>

Разрушение образцов серии ДС-2 происходило хрупко в результате их раскалывания по диагонали при значениях касательных напряжений, в два раза превышающих значения  $\tau_{max}$  образцов серии ДС-1. При этом вплоть до разрушения опытных образцов сохранялась пропорциональность между приращением касательных напряжений и относительных деформаций в каменной кладке. Характер разрушения и диаграммы деформирования образцов каменной кладки серии ДС-2 приведены на рисунке 4.



а)



а) характер разрушения опытных образцов;  
б) графики зависимости « $\tau_{obs} - \epsilon_{obs}$ »

Рисунок 4 – Результаты испытаний образцов серии ДС-2

Среднее значение модуля сдвига  $G_{obs}$  при  $\tau_{obs} = 0,3\tau_{max}$  образцов серии ДС-2 оказалось в два раза выше, чем образцов серии ДС-1. При этом среднее значение предельного угла сдвиговых деформаций каменной кладки  $\gamma_{max}$  образцов серии ДС-2 составило 0,83 мм/м, что на 15 % ниже, чем образцов серии ДС-1. Экспериментальные значения деформационных характеристик каменной кладки образцов серии ДС-2 приведены в таблице 3.

**Таблица 3** – Деформационные характеристики каменной кладки образцов серии ДС-2

№ серии	№ образца	Предельные значения угла сдвиговых деформаций, $\gamma_{obs,i}$ (мм/м)	Модуль сдвига при $\tau_{obs} = 0,3\tau_{max}$ , $G_{obs,i}$ (МПа)
ДС-2	ДС-2-1	0,82	1194
	ДС-2-2	0,74	1475
	ДС-2-2	0,93	1184
<b>Среднее арифметическое</b>		<b>0,83</b>	<b>1280</b>

Из таблиц 1, 2, 3 следует, что отношение модуля сдвига  $G$  к модулю упругости  $E$  каменной кладки со стыковым соединением керамических блоков «паз-гребень» ниже значения 0,4, установленного в нормативных документах. Если стыковые соединения керамических блоков не заполнены раствором, то  $G/E = 0,14$ . В случае заполнения стыковых соединений блоков клеевым раствором  $G/E = 0,29$ .

#### Заключение

На основании изложенного можно заключить, что положения нормативных документов, касающиеся деформационных характеристик каменных кладок, требуют корректировки в части определения модуля сдвига кладок из керамических поризованных пазогребневых блоков. По результатам экспериментальных исследований отношение  $G/E$  для указанных кладок оказалось на 185 % ниже нормируемого значения при незаполненных раствором стыковых соединениях между блоками и на 40 % ниже в случае заполнения стыковых соединений клеевым раствором. Неучет данного фактора может приводить к ошибкам при проверке предельных состояний несущей способности и эксплуатационной пригодности работающего на сдвиг стенового ограждения.

#### Список цитированных источников

1. Грановский, А. В. О применении крупноформатных керамических многоспустотных камней при возведении зданий в различных регионах, включая сейсмоопасные / А. В. Грановский [и др.] // Промышленное и гражданское строительство. – 2013. – № 4. – С. 52–55.
2. Деркач, В. Н. Деформационные характеристики каменной кладки в условиях плоского напряженного состояния / В. Н. Деркач // Строительство и реконструкция. – Орел: ОрелГТУ, 2012. – № 2 (40). – С. 3–11.
3. Kubica, J. Mechanika muru obciążonego w swej płaszczyźnie. Monografie Politechniki Śląskiej / J. Kubica. – Gliwice, 2011. – 382 p.
4. Семенцов, С. А. Теория расчета каменной кладки на изгиб при работе по неперевязанным сечениям / С. А. Семенцов // Исследования по каменным конструкциям: сб. науч. ст. / ЦНИПС; под науч. ред. Л. И. Онищика. – М., 1949. – С. 105–125.
5. Drobiec, L. Mury poddane zginaniu w ujęciu normy PN-EN 1996-1-1:2006 / Ł. Drobiec, R. Jasiński, A. Piekarczyk // Materiały budowlane. – 2009. – № 440. – S. 1–5.
6. Diagonal tensile strength tests of small walls specimens. TC76-LUM: RILEM LUMB6 1991. – Bruxelles: TC76-LUM, 1991. – 5 p.

#### References

1. Granovskij, A. V. O primenenii krupnoformatnyh kera-micheskikh mnogopustotnyh kamnej pri vozvedenii zdaniy v razlichnyh regionah, vključaya sejsmoopasnye / A. V. Granovskij [i dr.] // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. – 2013. – № 4. – S. 52–55.
2. Derkach, V. N. Deformacionnye harakteristiki kamennoj kladki v usloviyah ploskogo napryazhennogo sostoyaniya / V. N. Derkach // Stroitel'stvo i rekonstrukciya. – Orél: OrélGTU, 2012. – № 2 (40). – S. 3–11.
3. Kubica, J. Mechanika muru obciążonego w swej płaszczyźnie. Monografie Politechniki Śląskiej / J. Kubica. – Gliwice, 2011. – 382 p.
4. Semencov, S. A. Teoriya rascheta kamennoj kladki na izgib pri rabote po neperevyazannym secheniyam / S. A. Semencov // Issledovaniya po kamennym konstrukciyam: sb. nauch. st. / CNIPS; pod nauch. red. L. I. Onishchika. – M., 1949. – S. 105–125.
5. Drobiec, L. Mury poddane zginaniu w ujęciu normy PN-EN 1996-1-1:2006 / Ł. Drobiec, R. Jasiński, A. Piekarczyk // Materiały budowlane. – 2009. – № 440. – S. 1–5.
6. Diagonal tensile strength tests of small walls specimens. TC76-LUM: RILEM LUMB6 1991. – Bruxelles: TC76-LUM, 1991. – 5 p.

Материал поступил 23.01.2023, одобрен 23.01.2023, принят к публикации 23.01.2023