УДК: 624.042.1

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ КАМЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ И ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ НАГРУЗКАХ

Артюшин Дмитрий Викторович,

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, г. Пенза,

кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные конструкции».

Королева Юлия Игоревна,

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, г. Пенза,

студент.

Аннотация

В статье представлены результаты экспериментальных и аналитических исследований каменных стен при совместном действии вертикальных и горизонтальных нагрузок при различных соотношениях высоты стены к ее длине. Предложен аналитический метод расчета прочности конструкций из каменной кладки, основанный на каркасно-стержневой модели. Приводится сопоставление экспериментальных данных с результатами расчетов прочности стен.

Ключевые слова: конструкции из каменной кладки, экспериментальные исследования, каркасно-стержневая модель, предельное состояние, расчетные усилия, метод расчета.

EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL STUDY OF THE BEHAVIOR OF MASONRY STRUCTURES UNDER VERTICAL AND HORIZONTAL LOADS

Artyushin Dmitriy Viktorovich,

Penza State University of Architecture and Construction, Penza,

Candidate of Sciences, Associate Professor of the department «Building construc-

tions».

Koroleva Yulia Igorevna,

Penza State University of Architecture and Construction, Penza,

student.

Abstract

The article discusses options for strengthening reinforced concrete beams of buildings or structures. Technical solutions are proposed to ensure the beams' continued safe operation.

This article presents the results of experimental and analytical studies on masonry walls subjected to the combined action of vertical and horizontal loads, considering various height-to-length ratios. An analytical method for determining the strength of masonry structures, based on a frame-strut model, is proposed. Experimental data are compared with the results of wall strength calculations.

Keywords: masonry structures, experimental studies, frame-strut model, limiting state, design forces, calculation method.

Вопросы корректной оценки прочности конструкций из каменной кладки, в том числе при совместном действии вертикальных и горизонтальных сил, до настоящего времени не потеряли своей актуальности. До сих пор отсутствуют в достаточном количестве целенаправленные экспериментальные исследования, учитывающие изменение таких основных факторов, как схемы нагружения, соотношения размеров сторон, специфика действия горизонтальных нагрузок, новые конструктивные решения стен и др. В данной статье освещаются результаты экспериментально-аналитических исследований стен разной высоты из каменной кладки при совместном действии вертикальных и горизонтальных сил, проведенные в ПГУАС [1-7].

Согласно программе экспериментальных исследований испытано 15 образцов стен из каменной кладки. Образцы выполнялись из моделей обыч-

ного полнотелого керамического кирпича, изготовленных в масштабе 1:2 (рисунок 1).

а) б)

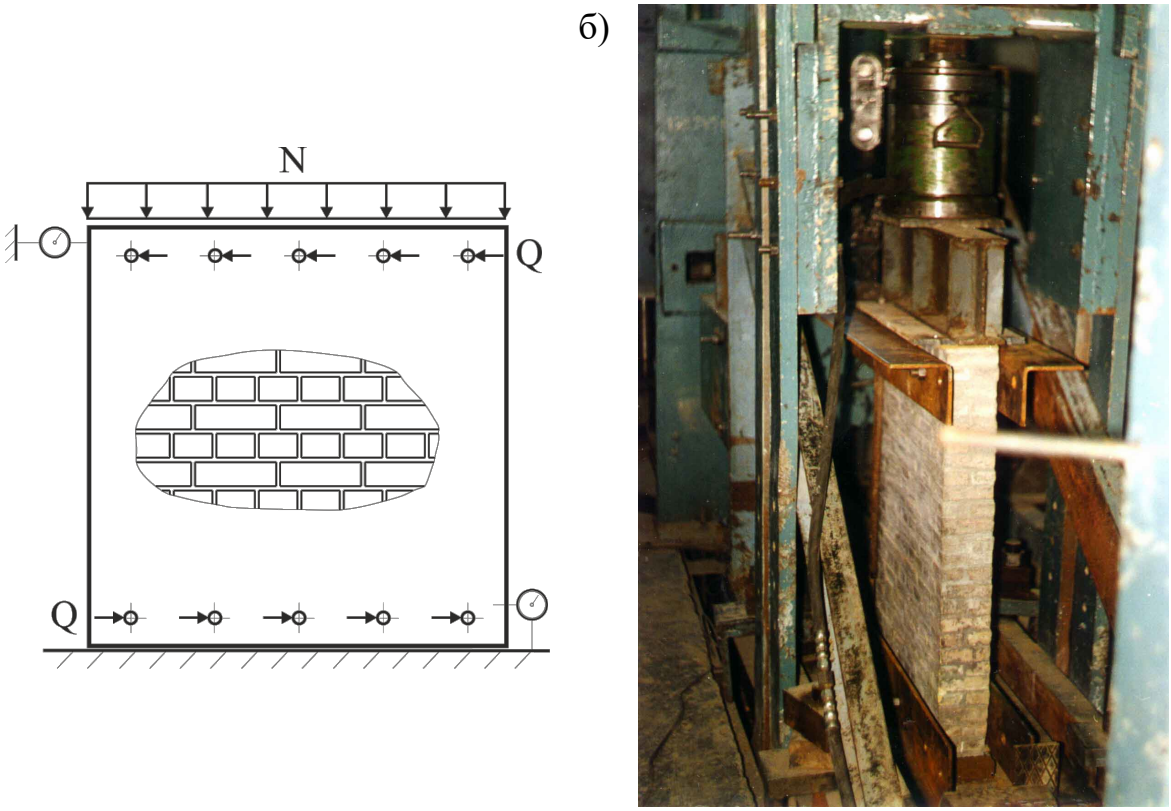


Рисунок 1 – Схема (а) и общий вид (б) испытания образцов стен из каменной кладки

Выбор схемы нагружения основывался на действительной работе стен, когда вертикальная нагрузка равномерно распределялась по длине стены, а горизонтальная – концентрировалась в верхнем и нижнем уровнях стены и передавалась равномерно по ее длине. Схема приложения нагрузки являлась постоянной для всех видов исследований.

В исследованиях выявлено и принято два основных фактора. В качестве первого фактора было принято соотношение вертикальных и горизонтальных сил при изменении величины вертикальной нагрузки $N=(0 \div 1{,}0)N_u$, где N_u – разрушающая вертикальная сила при горизонтальной равной нулю. В качестве второго фактора – соотношение размеров сторон H/L=0,5; 1,0; 1,5; 2,5.

В результате испытаний выявлен характер изменения напряженно-деформированного состояния и прочности стен в зависимости от изменения основных факторов, а также выявлены схемы разрушения стен, характер образо-

вания и развития трещин. Установлено, что в характере разрушения образцов четко прослеживается закономерность изменений схем разрушения, определяемая соотношением вертикальных и горизонтальных сил и соотношением размеров сторон стен. В связи с этим разрушения можно разделить на четыре схемы.

Первая схема (при N=0) – разрушение происходит в результате развития внутри наклонной сжатой полосы диагональной трещины, имеющей форму штрабы (рисунок 2 а).

Вторая схема (при N=0,25N_u) – разрушение происходит при развитии внутри наклонной сжатой полосы серии близко расположенных друг к другу трещин, которые затем сливаются, образуя узкие участки раздробления каменной кладки (рисунок 2 б).

Третья схема (при N=0,5N_u) – разрушение происходит при активном развитии серии трещин различной длины внутри наклонной и вертикальной сжатых полос, образующих V-образный участок (рисунок 2 в).

Четвертая схема (при N=0,75N_u и при N=N_u) – разрушение происходит при развитии параллельно расположенных вертикальных трещин, с небольшим отклонением от вертикального направления при N=0,75N_u (рисунок 2 г, д).

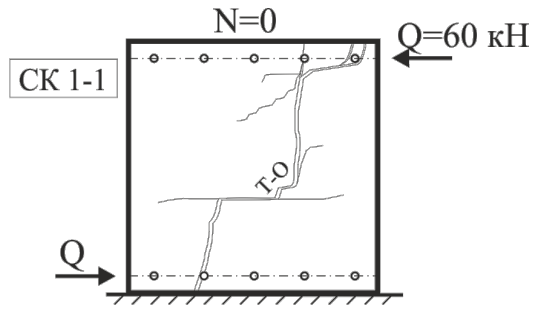
С увеличением соотношения сторон схемы разрушения стен изменяются не существенно. В низких образцах (при соотношении H/L=0,5) сближение зон нагружения стен с опорным сечением сопровождается появлением серии наклонных трещин.

В результате анализа видов разрушения установлено, что в стенах при совместном действии вертикальных и горизонтальных сил возникают две зоны, образующие V-образный участок, в пределах которого концентрируются главные сжимающие напряжения. С изменением высоты стен и величины вертикального усилия конфигурация зон, в пределах которых концентрируются главные сжимающие напряжения, не изменяется. В низких стенах (при H/L=0,5) с уменьшением вертикальных усилий увеличивается угол наклона главных сжимающих напряжений и ширина участка, в пределах которого они

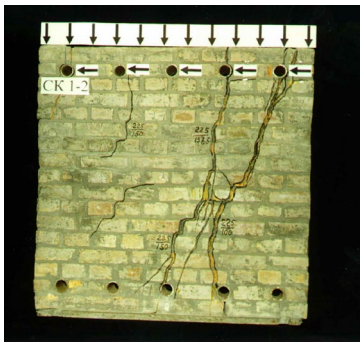
концентрируются. В высоких стенах (при H/L=2,5) с уменьшением вертикальных усилий возрастает величина сжимающих напряжений в нижней части V-образного участка концентрации главных сжимающих напряжений.

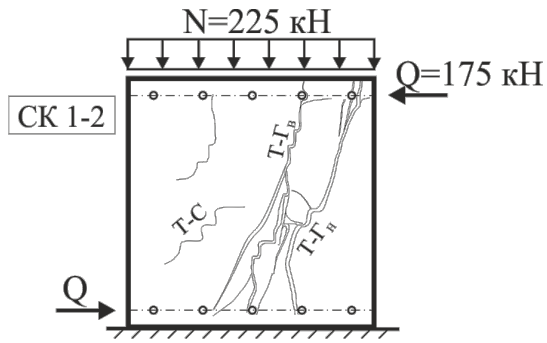
а)





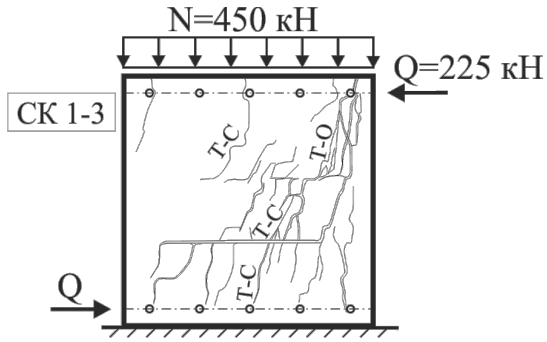
б)





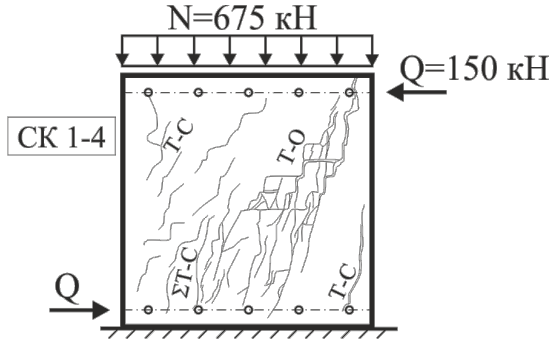
в)





г)





д)

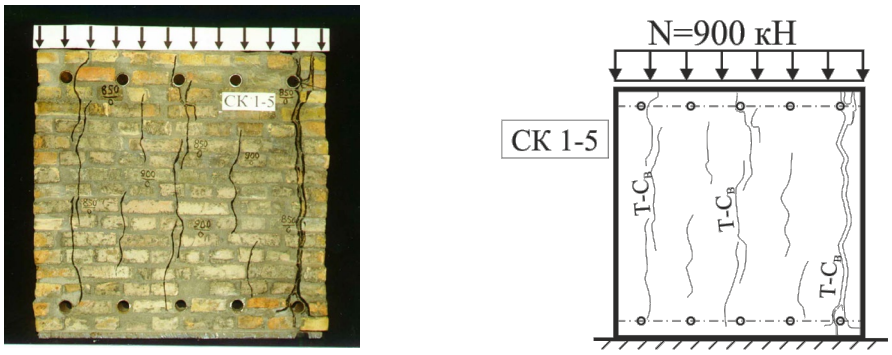


Рисунок 2 – Характер образования трещин с ростом вертикальной нагрузки

Для комплексной оценки влияния изучаемых факторов на прочность стен по полученным величинам разрушающих усилий построен пространственный график изменения разрушающих усилий в зависимости от величины вертикального усилия и соотношения сторон, рисунок 3. Анализируя данный график, можно отметить, что с увеличением вертикальной нагрузки до $N=0{,}5N_u$ во всех испытываемых стенах независимо от соотношения сторон происходило увеличение разрушающей силы. Для образцов с соотношением $H/L=1{,}0$ и $H/L=0{,}5$ проводились испытания с изменением вертикальной силы до $N=N_u$. В этих образцах, как показывает эксперимент, разрушающая сила Q снижается от максимальной величины при $N=0{,}5N_u$ до нуля при $N=N_u$.

Интенсивность роста разрушающей силы Q для образцов с соотношением $H/L=0{,}5$; 1,0; 1,5; 2,5 была различной, рисунок 3. Сопоставляя линии графика на рис. 3, можно отметить, что наиболее интенсивный рост разрушающей силы отмечается для низких стен (при $H/L=0{,}5$). С увеличением высоты стены интенсивность роста снижается, при этом разрыв между графиками разрушающей силы для стен с соотношением $H/L=1{,}5\div2{,}5$ значительно сокращается.

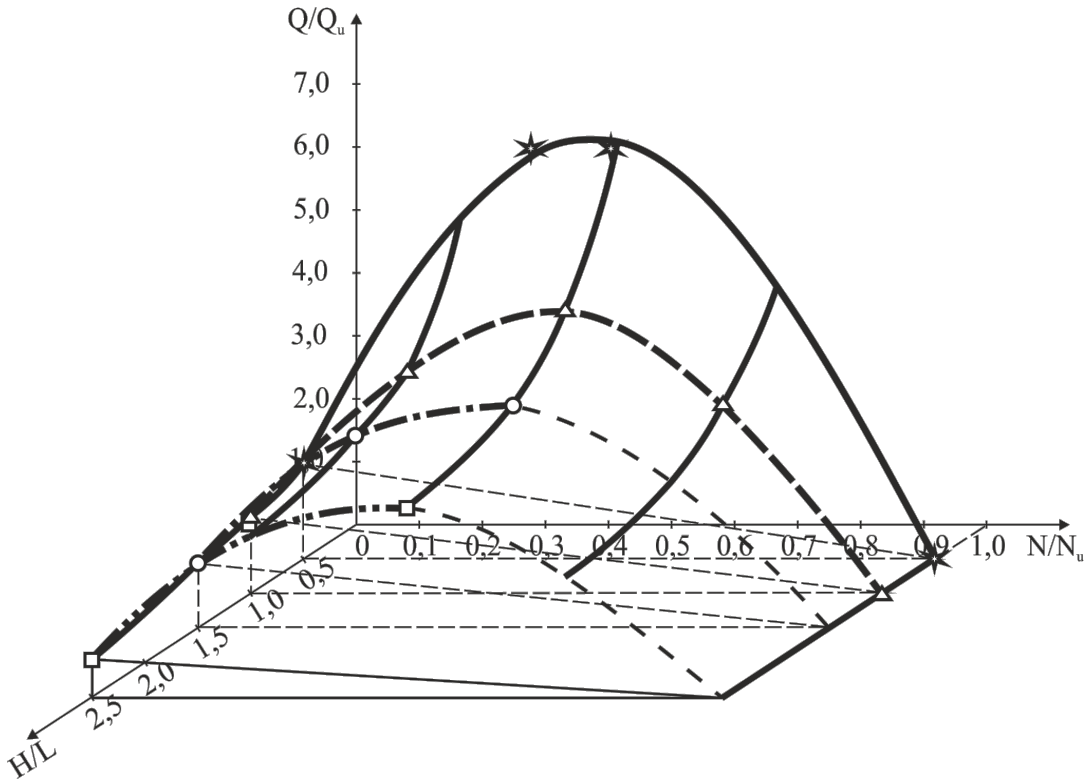


Рисунок 3 – Графики зависимости прочности стен от изменения соотношения вертикальных и горизонтальных сил и изменения соотношения размеров сторон

Полученные результаты исследований были использованы при разработке метода расчета прочности стен из каменной кладки при совместном действии вертикальной и горизонтальной нагрузки на основе расчетной модели, представляющей собой каркасно-стержневую систему, рисунок 4. Согласно предлагаемой модели прочность стен при совместном действии вертикальных и горизонтальных сил определяется прочностью наклонной сжато-растянутой полосы кладки и прочностью вертикального растянутого стержня-пояса.

Предельным состоянием по растянутой зоне является состояние, когда напряжение в растянутой арматуре достигает предельных значений – $\gamma_s R_s$. Предельным состоянием по наклонной сжато-растянутой полосе является состояние, когда напряжение в каменной кладке по ширине расчетной полосы достигает предела прочности при сжатии – $\gamma_r R$ и предела прочности при растяжении – $\gamma_{rt} R_t$ по длине полосы. Особенности работы каменной кладки и харак-

тер изменения прочности кладки в зависимости от изменения угла наклона между линией действия главных сжимающих напряжений и осью постельных швов предлагается учитывать введением расчетных коэффициентов γ_{σ_c} и γ_{σ_t}.

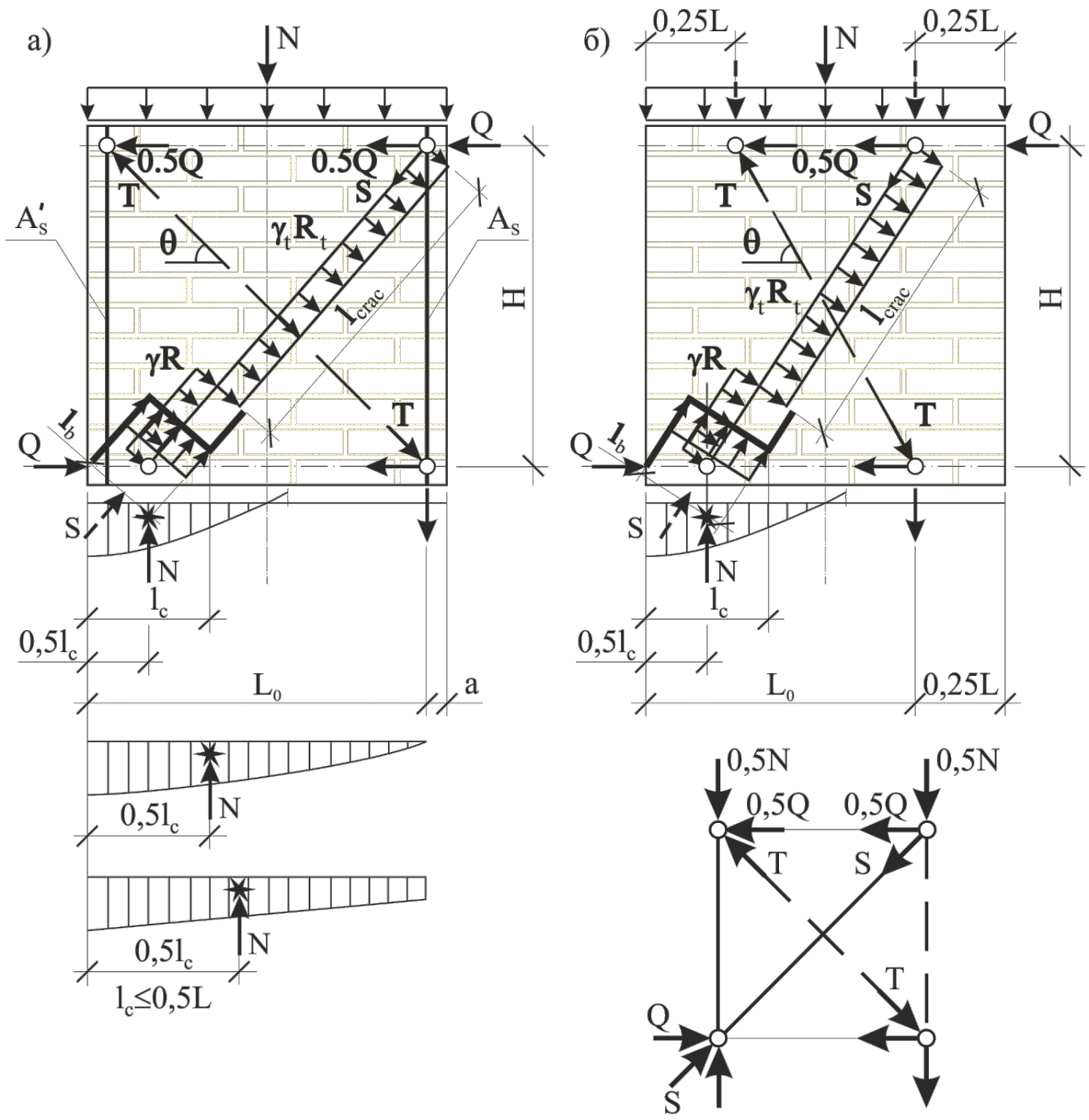
На основе разработанной расчетной модели составлены условия прочности: по растянутой и сжатой зонам, зависимости (1) и (2), соответственно:

$$Q \le 2\,\gamma_s\, R_s A_s / tg\theta + N; \tag{1}$$

$$Q \le \gamma_c\, \gamma_r\, \gamma_{\sigma_c}\, R\, b\, l_b\, Cos\theta + \gamma_t\, \gamma_{rt}\, \gamma_{\sigma_t}\, R_t\, b\, l_{crac}\, Sin\theta. \tag{2}$$

Расчетные зависимости предлагаемого метода расчета в полной мере описывают закономерность изменения разрушающей силы при изменении основных исследуемых факторов – соотношения сил и соотношения сторон.

Преимуществом расчетной модели является ее простой вид, однако она не может отразить всю сложность физической работы стен из каменной кладки. Для того чтобы идентифицировать работу стен и результаты расчета, проделана большая работа по составлению системы уравнений для определения идентифицирующих коэффициентов.



○ - ключевые точки каркасно-стержневой модели

Рисунок 4 – Расчетные схемы стен из каменной кладки при совместном действии вертикальных и горизонтальных сил на основе каркасно-стержневой модели:

а – при наличии концентрированной арматуры в растянутой зоне;
б – при отсутствии концентрированной арматуры

В условии (2) введена система коэффициентов, которая осуществляет идентификацию расчетных и опытных величин:

– влияние изменения соотношения сторон стены на прочность сжатой наклонной полосы, коэффициент γ_c:

$$\gamma_c = 1{,}7 - 0{,}9\, H/L \geq 0{,}8\,. \qquad (3)$$

– влияние совместного действия вертикальных и горизонтальных сил на прочность каменной кладки сжатой наклонной полосы, коэффициент γ_r:

$$\gamma_r = Sin\left\{\pi\left[\frac{N}{N_u} + \varphi_{\gamma r}\left(1 - \frac{N}{N_u}\right)\right]\right\}. \qquad (4)$$

– влияние угла наклона постельных швов каменной кладки на величину главных сжимающих напряжений, коэффициент γ_{σ_c}:

$$\gamma_{\sigma_c} = 0{,}75 + 0{,}35\, Cos\,(2\,\theta + 0{,}75\,\pi)\,. \qquad (5)$$

– влияние изменения соотношения сторон стены на прочность растянутой наклонной полосы, коэффициент γ_t:

$$\gamma_t = 1{,}1 - 0{,}4\, H/L \geq 0{,}5\,. \qquad (6)$$

– влияние совместного действия вертикальных и горизонтальных сил на прочность каменной кладки при растяжении наклонной полосы, коэффициент γ_{rt}:

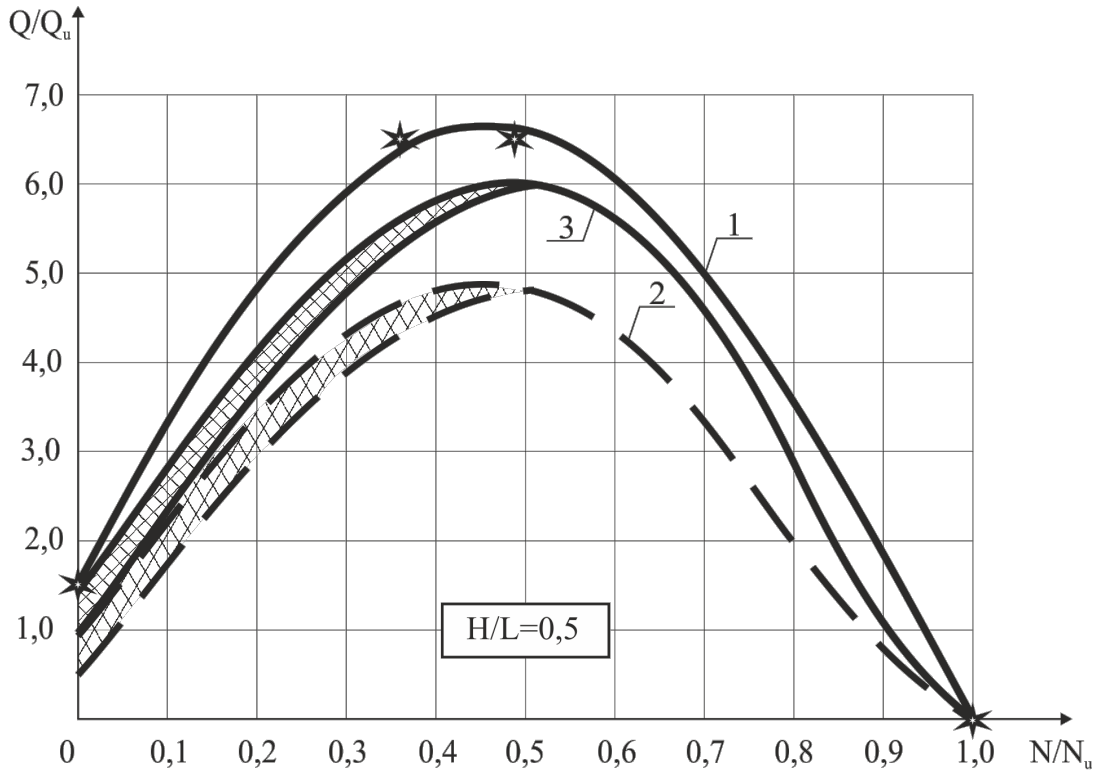
$$\gamma_{rt} = Cos\left(\pi\, N/N_u\right). \qquad (7)$$

– влияние угла наклона постельных швов каменной кладки на величину главных растягивающих напряжений, коэффициент γ_{σ_t}:

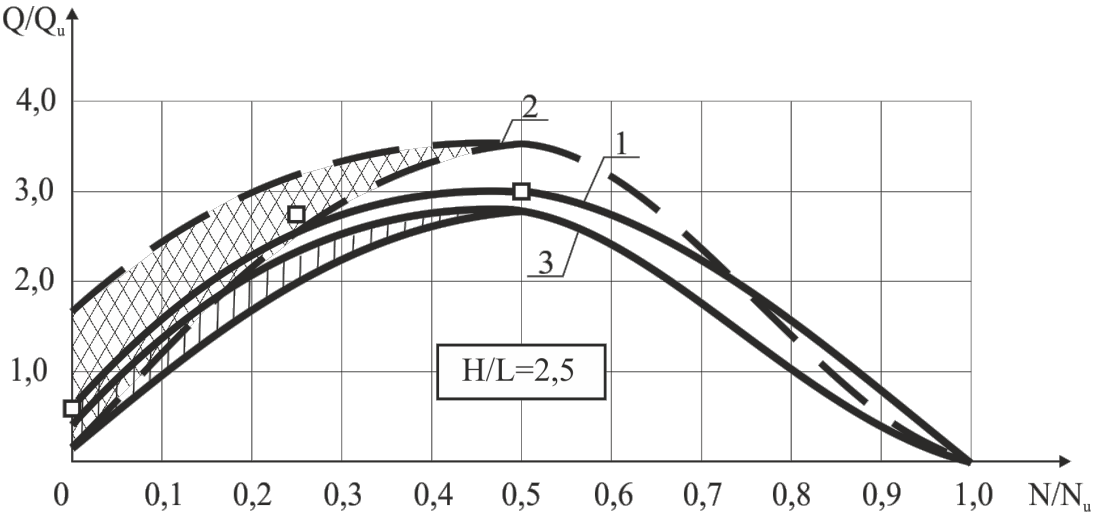
$$\gamma_{\sigma_t} = 0{,}75\,[1 - Cos\,(2\,\theta + 0{,}75\,\pi)]\,. \qquad (8)$$

На рисунке 5 приведены графики сопоставления расчетной зависимости (2) с графиком изменения разрушающих сил при изменении соотношения H/L=0,5÷2,5 и вертикальной силы от N=0 до N=N_u. Анализируя приведенные графики, следует отметить, что расчетная зависимость в полной мере описывает закономерность изменения разрушающей силы при изменении основных исследуемых факторов. Введение в расчетную зависимость (2) системы коэффициентов обеспечивает необходимую безопасность и количественно сближает расчетные и опытные усилия. Максимальные отклонения опытных и расчетных величин составляют Q_{test}/Q_{calc}=0,95÷1,2.

а)



б)



Заштрихованная область характеризует степень влияния растягивающих напряжений на работу сжато-растянутой полосы

Рисунок 5 – Сравнение результатов опытов и расчета при *H/L*=0,5 (а) и *H/L*=2,5 (б)

1 – график опытных величин;
2 – график расчетных величин без корректировки;
3 – график расчетных величин после корректировки

Выводы:

1. Модель работы стен из каменной кладки при совместном действии вертикальных и горизонтальных сил можно представить в виде симметричных Х-

образных стержневых участков, оси которых входят в стержневую модель, состоящую из наклонных, вертикальных и горизонтальных стержней. Вертикальные стержни имитируют арматурные пояса или примыкающие поперечные стены. Наклонные стержни имитируют концентрированные потоки сжимающих и растягивающих напряжений, пересекающиеся в центральной части стены. При расчете по предлагаемой стержневой модели по правилам строительной механики определяются усилия в каждом элементе модели.

2. Предельным состоянием по растянутой зоне является состояние, когда напряжение в растянутой арматуре достигает предельных значений $-\gamma_s R_s$. Предельным состоянием по наклонной сжато-растянутой полосе является состояние, когда напряжение в каменной кладке по ширине расчетной полосы достигает предела прочности при сжатии – $\gamma_r R$ и предела прочности при растяжении – $\gamma_{rt} R_t$ по длине полосы. На основе разработанной расчетной модели составлены условия прочности.

3. Предложенное аналитическое решение в полной мере описывает закономерность изменения разрушающей силы при изменении основных исследуемых факторов – соотношения сил и соотношения сторон. Введение в расчетную зависимость (2) коэффициентов надежности ($\gamma_c; \gamma_r; \gamma_{\sigma_c}; \gamma_t; \gamma_{rt}; \gamma_{\sigma_t}$) обеспечивает необходимую безопасность и количественно сближает расчетные и опытные усилия.

Библиографический список:

1. Баранова Т.И. Сопротивление стен из каменной кладки при совместном действии вертикальных и горизонтальных сил: Т.И. Баранова, Н.Н. Ласьков, Д.В. Артюшин // БСТ. 1999. №9. С. 17–18.

2. Баранова Т.И. Экспериментально-теоретические исследования стен из каменной кладки при совместном действии вертикальных и горизонтальных сил / Т.И. Баранова, Д.В. Артюшин // Строительная индустрия: вчера, сегодня, завтра: сб. статей МНПК. Пенза, 2011. С. 45–50.

3. Артюшин Д.В. Расчет и конструирование каменных и армокаменных конструкций / Д.В. Артюшин, А.В. Туманов. Пенза: ПГУАС, 2013. 118 с.

4. Artyushin D. Experimental and analytical study of the behavior of masonry structures / D. Artyushin, G. Boldyrev – AMCM 2014, Wroclaw, Poland, June 16-18, 8-th International Conference. P. 172–173.

5. Артюшин Д.В. Результаты экспериментальных исследований стен из каменной кладки: Д.В. Артюшин, П.В. Баркаров // XV Международная научно-техническая конференция «Эффективные строительные конструкции: теория и практика»: сб. статей. – Пенза, 2015. С. 17–22.

6. Артюшин Д.В. Каменные и армокаменные конструкции. Расчет и конструирование / Д.В. Артюшин, Н.Н. Ласьков, А.В. Туманов, С.А. Болдырев, С.А. Толушов. Пенза: ПГУАС, 2015. 116 с.

7. Ласьков Н.Н. Влияние толщины кирпичных стен на прочность при совместном действии вертикальных и горизонтальных сил: Н.Н. Ласьков, А.Н. Ласьков, Д.В. Артюшин // XIX Международная научно-техническая конференция «Эффективные строительные конструкции: теория и практика»: сб. статей. Пенза, 2019. С. 78–82.