

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING CONSTRUCTIONS, BUILDINGS AND ENGINEERING STRUCTURES



УДК 624.073+624.012+624.044

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949–1835-2025-4-3-7-17>

Оценка и анализ перемещений от изгиба $\Delta_{flexure}$ и сдвига Δ_{shear} железобетонных стен гражданских зданий

О.В. Радайкин^{1,2}  , Н.В. Хнычева² 

¹ Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Российская Федерация

² Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Российская Федерация

 olegxxii@mail.ru



EDN: ITESKN

Аннотация

Введение. К настоящему времени в отечественной и зарубежной научной литературе накоплен обширный экспериментальный материал по исследованию перемещений и деформаций железобетонных стен при совместном действии горизонтальной Q и вертикальной N нагрузок. Однако отсутствуют обобщающие работы, систематизирующие полученные данные с целью их использования в качестве эмпирического базиса для построения более точных деформационных моделей и инженерных методик расчета стен, позволяющих дифференцированно оценивать перемещения изгиба $\Delta_{flexure}$ и сдвига Δ_{shear} . Данная статья направлена на решение этой проблемы.

Материалы и методы. Объект исследований — железобетонные стены зданий и сооружений при совместном действии горизонтальной Q и вертикальной N нагрузок. Предмет исследований — перемещения и деформации стен. Материалы — научные статьи зарубежных авторов, посвященные исследуемому вопросу. Методы — формальная логика (анализ, синтез, индукция, дедукция), графический метод построения схем деформирования, аналитические методы нелинейной строительной механики.

Результаты исследования. При соотношении сторон стены $1,5 < H/B < 2,0$ преобладают изгибные перемещения $\Delta_{flexure}$ в структуре общих перемещений Δ , а перемещения горизонтального скольжения Δ_{slid} составляют порядка 1 % от Δ , и ими можно пренебречь. Доля перемещений от изгиба $\Delta_{flexure}$ составляет приблизительно 98 % от Δ на начальных этапах. С увеличением горизонтальной нагрузки Q вклад перемещений $\Delta_{flexure}$ постепенно снижается: до 90 % — в момент появления трещин, до 85 % — при текучести вертикальной арматуры и до 80 % — в стадии разрушения (при выкрашивании сжатого бетона).

При соотношении сторон стены $1,0 < H/B < 1,5$ перемещение Δ_{shear} оказывает значительное влияние на общее перемещение Δ : доля Δ_{shear} на начальных этапах нагружения составляет около 22 %, в момент отслоения защитного слоя бетона — 46 %, и достигает 64 % в момент разрушения.

По графикам относительных перемещений стены при соотношении сторон $1,5 < H/B < 2,0$ нами выявлено, что в стадии разрушения доля перемещений при изгибе и сдвиге составляет соответственно 88 % и 12 % от общих. Аналогичные графики получены для стен с соотношением сторон $1,0 < H/B < 1,5$ и установлено, что перемещение Δ_{shear} оказывает значительное влияние на общее перемещение Δ . Доля Δ_{shear} на начальных этапах нагружения составляет около 22 %, в момент отслоения защитного слоя бетона — 46 % и достигает 64 % в момент разрушения.

Обсуждение и заключение. Метод «Х-диагоналей», реализованный в плоской расчетной схеме, позволяет с высокой точностью выделить из общих перемещений составляющие, вызванные деформациями изгиба и сдвига. Благодаря этому преимуществу, данная схема является перспективным инструментом для дальнейших экспериментальных и теоретических исследований. Причем, на наш взгляд, высота фрагмента стены, в границах которого строятся диагонали, должна быть произвольной — H_i , что позволит сделать данный метод более универсальным.

Помимо плоской расчетной схемы возможно использование и стержневой. Стержневую расчетную схему стены при известных закономерностях об изменении жесткостных параметров стержня на концевых участках (в местах образования пластических шарниров) удобно применять в инженерных расчетах каркасных зданий и сооружений на основе метода конечных элементов в том или ином вычислительном комплексе.

Ключевые слова: железобетон, монолитные стены, экспериментальные данные, прочность стены, перемещения при изгибе, перемещения при сдвиге, общие перемещения, деформация при изгибе, деформация при сдвиге, общая деформация

Благодарности. Авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и указанные замечания, которые позволили повысить ее качество.

Для цитирования. Радайкин О.В., Хнычева Н.В. Оценка и анализ перемещений от изгиба $\Delta_{flexure}$ и сдвига Δ_{shear} железобетонных стен гражданских зданий. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2025;4(3):7–17. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-3-7-17>


Original Empirical Research

Determination and Analysis of Flexure $\Delta_{flexure}$ and Shear Δ_{shear} Displacements of Reinforced Concrete Walls of Civil Buildings

Oleg V. Radaikin^{1,2}  , Nadezhda V. Hnycheva² 

¹Kazan Federal University, Kazan, Russian Federation

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russian Federation

 olegxxii@mail.ru

Abstract

Introduction. To date, there have been extensive experimental data made available in both domestic and foreign scientific literature on the study of displacements and deformations of reinforced concrete walls under the combined action of horizontal load Q and vertical load N . However, there are not enough comprehensive works systematizing the obtained data to be used as an empirical basis for designing more accurate deformation models and engineering calculation methods for walls, allowing differentiated assessment of flexure $\Delta_{flexure}$ and shear Δ_{shear} displacements. This article aims to look into this issue.

Materials and Methods. The object of the study is reinforced concrete walls of buildings and structures under the combined action of horizontal load Q and vertical load N . The subject of the study are the displacements and deformations of the walls. Materials include scientific articles on the topic by foreign authors. The methods being used are formal logic (analysis, synthesis, induction, deduction), graphical methods for constructing deformation schemes, and analytical methods of nonlinear structural mechanics.

Research Results. For wall aspect ratios $1.5 < H/B < 2.0$, flexure $\Delta_{flexure}$ displacements dominate in the total displacement structure Δ , while horizontal sliding displacements Δ_{slid} amount to about 1% of Δ and can be neglected. The share of flexure $\Delta_{flexure}$ is approximately 98% of Δ at the initial loading stages. As horizontal load Q increases, the contribution of $\Delta_{flexure}$ gradually decreases: to 90% at the moment of crack formation, to 85% at the yielding of vertical reinforcement, and to 80% at the failure stage (when compressed concrete spalls).

For wall aspect ratios $1.0 < H/B < 1.5$, shear displacement Δ_{shear} has a significant influence on the total displacement Δ : its share at the initial loading stages is about 22%, while determining a protective concrete layer — 46%, and reaches 64% at failure.

Using the graphs of relative displacements of walls with aspect ratios $1.5 < H/B < 2.0$, it was found that at the failure stage, the shares of flexure and shear displacements are 88% and 12% of the total, respectively. Similar graphs obtained for walls with aspect ratios $1.0 < H/B < 1.5$ confirmed that Δ_{shear} significantly affects the total displacement Δ . The share of Δ_{shear} at initial loading is about 22%, while determining a protective concrete layer — 46%, and reaches 64% at failure.

Discussion and Conclusion. The "X-diagonals" method implemented in a planar calculation scheme allows for highly accurate separation of components caused by flexure and shear deformations from the total displacements. Thanks to this the scheme is a promising tool for further experimental and theoretical studies. We assume that the height of the wall segment where the diagonals are designed should be arbitrary — H_i making this method more universal.

In addition to the planar calculation scheme, a rod (beam) scheme can also be used. The rod calculation scheme of the wall, with known patterns of stiffness parameter changes in the rod end sections (at the locations of plastic hinge formation), is convenient for engineering calculations of frame buildings and structures based on the finite element method in diverse computational complexes.

Keywords: reinforced concrete, monolithic walls, experimental data, wall strength, flexure displacements, shear displacements, total displacements, flexure deformation, shear deformation, total deformation

Acknowledgments. The authors appreciate the reviewers, whose critical assessment of the submitted materials and suggestions helped to significantly improve the quality of this article.

For citation. Radaikin OV, Khnycheva NV. Determination and Analysis of Flexure $\Delta_{flexure}$ and Shear Δ_{shear} Displacements Displacements of Reinforced Concrete Walls of Civil Buildings. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2025;4(3):7–17. <https://doi.org/10.23947/2949–1835-2025-4-3-7-17>

Введение. Железобетонные стены относятся к самым распространенным видам строительных конструкций зданий и сооружений. Часто они совмещают несущую и ограждающую функции, испытывают действие вертикальных и горизонтальных нагрузок и, как следствие, работают в условиях сложного напряженно-деформированного состояния. Достоверная оценка возникающих при этом деформаций служит залогом их точного механического расчета и дальнейшей безопасной эксплуатации. Анализу перемещений и деформаций стен посвящена данная публикация.

Для дальнейшего изложения проясним терминологию:

– перемещение — это изменение координат рассматриваемой точки твердого тела (железобетонной стены в нашем случае) в пространстве под действием на него нагрузок (внешних сил), которое в данной статье обозначается греческой буквой Δ_{index} со своим нижним индексом, обозначающим характер влияния на это перемещение деформаций твердого тела, таких как изгиб, сдвиг, скольжение и т.п.;

– деформация — это изменение размеров и формы самого твердого тела под действием нагрузки, то есть это взаимные перемещения точек твердого тела относительно друг друга в пространстве. В качестве деформаций рассматриваются линейные относительные деформации — ε , углы сдвига — γ , углы поворота сечений твердого тела относительно его осей — φ и кривизна самих осей — χ (прим.: в литературе также часто обозначаются $1/\rho$).

Общее перемещение какой-либо точки железобетонной стены от нагрузок, действующих в ее плоскости, можно разложить на следующие составляющие:

$$\Delta = \Delta_{flexure} + \Delta_{shear} + \Delta_{slid} + \Delta_{BR}, \quad (1)$$

где $\Delta_{flexure}$ — перемещения, обусловленные влиянием деформаций чистого изгиба; Δ_{shear} — перемещения, обусловленные влиянием деформаций чистого сдвига в плоскости стены; Δ_{slid} — перемещения, обусловленные влиянием деформаций сдвига-скольжения низа либо верха стены; Δ_{BR} — перемещения, обусловленные влиянием поворота низа или верха стены относительно фундамента или перекрытия.

После изучения научно-технической литературы, анализ которой представлен ниже, нами выявлена следующая проблема: отсутствуют обобщающие работы, систематизирующие экспериментальные данные (которых за последние десятилетия накопилось немало), по деформированию железобетонных стен при совместном действии горизонтальной, Q , и вертикальной, N , нагрузок. Это является определенным препятствием как для совершенствования существующих методов и методик дифференцированного расчета перемещений изгиба $\Delta_{flexure}$ и сдвига Δ_{shear} железобетонных стен, так и для создания принципиально новых подходов. На преодоление этого препятствия направлены данные исследования.

При этом перемещения от нагрузок, действующих из плоскости стены, выходят за рамки рассмотрения данных исследований.

Материалы и методы. Ранее в работе [1] нами были описаны общие механизмы деформирования и разрушения стен при совместном влиянии отношения нагрузок N/Q и отношения высоты стены к ее ширине — H/B . Установлено, что отношение H/B качественно предопределяет механизм разрушения стены, то есть влияет на картину появления и развития трещин от микроскопического размера до магистральных трещин, по траектории которых конструкция стены разделяется на отдельные части. Соотношение нагрузок N/Q отвечает за количественные значения параметров реализации этого механизма. При малых значениях H/B преобладает доля сдвиговых перемещений Δ_{shear} в результирующих перемещениях стены Δ , а сопротивляемость горизонтальной нагрузке Q_u является максимальной. При этом разрушение носит более хрупкий характер. С увеличением отношения H/B доля изгибных перемещений $\Delta_{flexure}$ возрастает, а сдвиговых Δ_{shear} — падает; снижается также и Q_u , пластические деформации проявляются более интенсивно.

Описанные в [1] механизмы деформирования и разрушения стен под нагрузкой позволяют строить для них деформированные схемы с наложением схемы внутренних усилий, уравнивающих внешние нагрузки. Эти деформированные схемы дают возможность вычислять общие перемещения стены Δ на характерных ее участках, а самое главное — вычленять из общих перемещений составляющие, обусловленные влиянием деформаций изгиба и сдвига — соответственно $\Delta_{flexure}$ и Δ_{shear} . Ниже рассмотрены некоторые варианты таких схем разных авторов с их анализом на предмет соответствия каждой из них действительной работе конструкции стен и удобства их применения в качестве инструмента для анализа НДС стен.

Результаты исследования. Одна из таких схем приведена в работах [2, 3]. С учетом наших дополнений, необходимых для полной ясности картины, она представлена на рис. 1.

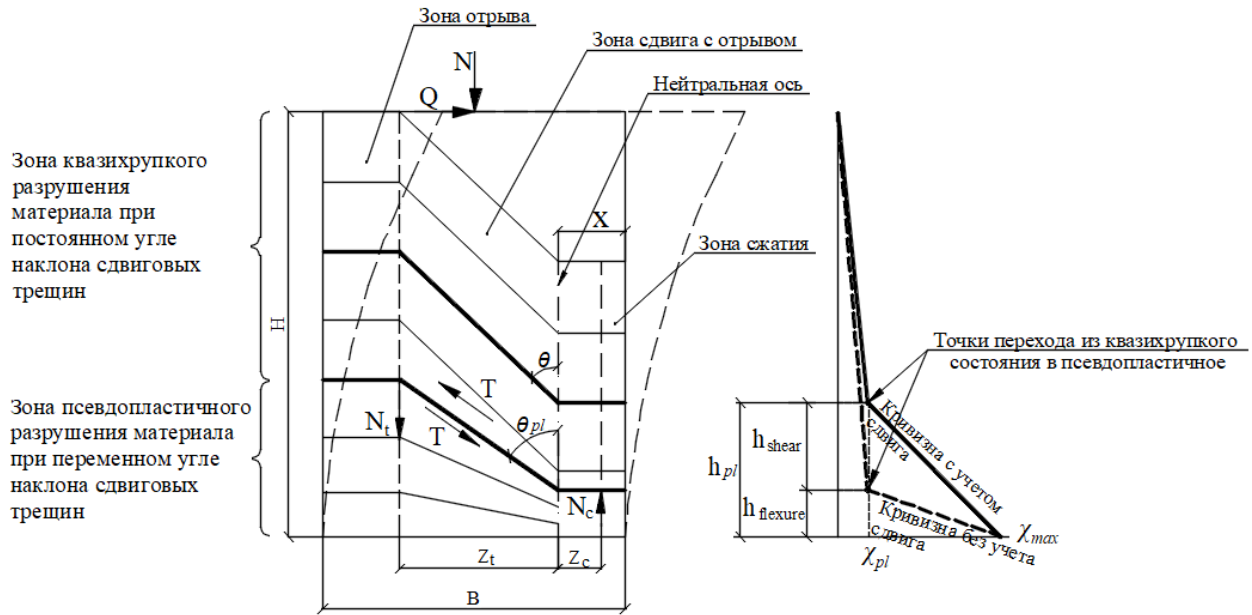


Рис. 1. Расчетная схема деформирования железобетонной стены (слева) при совместном действии вертикальной N и горизонтальной Q нагрузки и график распределения кривизны по ее высоте (справа) [2]

Схема представляет собой прямоугольную пластину с защемленной нижней гранью, все остальные три грани свободны от связей. Сверху прикладываются вертикальная нагрузка N и горизонтальная — Q . На пластину нанесена схема веерообразных трещин, характер которых выявлен в ходе эксперимента. По траектории одной из трещин проведено расчетное сечение — первая снизу жирная линия. Оно пересекает слева растянутую зону стены, или зону отрыва, в которой преобладает отрывной механизм образования трещин; в центре — зону совместного сдвига и отрыва, в которой накладываются два механизма образования трещин — поперечный отрыв и продольный сдвиг; справа — зону сжатия стены. Устойчивое развитие трещин происходит главным образом за счет диссипации (рассеивания) накопившейся энергии упругопластического деформирования чистого изгиба, которая обуславливает перемещения $\Delta_{flexure}$, а деформации сдвига или скольжения, обуславливающие соответственно перемещения Δ_{shear} и Δ_{slid} , приводят к спонтанному растрескиванию и почти мгновенному хрупкому разрушению в локальной зоне.

Справа на рис. 1 приведены теоретические эпюры кривизны нейтральной оси стены. Сплошная линия соответствует полной кривизне, определенной при совместном учете изгибных и сдвиговых деформаций, пунктирная — только при учете изгиба без сдвига. Каждая эпюра состоит из двух прямых линий с разным углом наклона: в нижней части стены угол более пологий, соответственно, кривизна по высоте меняется более интенсивно, чем вверху. Точка перелома между этими участками соответствует переходу от квазихрупкого механизма разрушения верха стены к псевдопластичному механизму разрушения низа стены. По ломаной линии расчетного сечения стены приложена система внутренних сил: N_c — равнодействующая сжимающих напряжений в бетоне; N_t — равнодействующая растягивающих напряжений в бетоне; T — равнодействующая касательных напряжений по берегам наклонной трещины. На рис. 1 также обозначено: $h_{flexure}$, h_{pl} — высота зоны псевдопластичного разрушения низа стены соответственно в предположении, что возникают только деформации чистого изгиба, и при совместном учете деформаций изгиба и сдвига; χ_{pl} — кривизна, соответствующая высоте h_{pl} ; χ_{max} — максимальная кривизна; x — высота сжатой зоны; z_c — плечо равнодействующей N_c относительно нейтральной оси; z_t — плечо равнодействующей N_t также относительно нейтральной оси; θ , θ_{pl} — угол наклона трещин, образование которых происходит по отрывно-сдвиговому механизму соответственно в верхней зоне стены (над точкой перехода от квазихрупкого разрушения к псевдопластичному) и в нижней зоне (под этой точкой), при этом $\theta = const$, $\theta_{pl} = var$.

Заметим, что равнодействующая растягивающих напряжений N_t в расчетном сечении находится выше, чем равнодействующая сжимающих напряжений N_c именно из-за влияния деформаций сдвига. При чистом изгибе эти силы находились бы на одном горизонтальном уровне.

Угол наклона трещин θ_{pl} в точке перехода определяется по формуле:

$$\theta_{pl} = \arctg \left(\frac{z_t}{h_{shear}} \right), \quad (2)$$

где $h_{shear} = h_{pl} - h_{flexure}$.

По данным эксперимента [2] значение θ_{pl} находится в пределах от 55° до 65° .

На рис. 2 приведены эпюры кривизны нейтральной оси стены [2]: две теоретические — первая в предположении деформаций только изгиба (1), вторая — при совместном учете изгиба и сдвига (2), а также экспериментальная эпюра (3), которую описывают (аппроксимируют) предыдущие две теоретические эпюры.

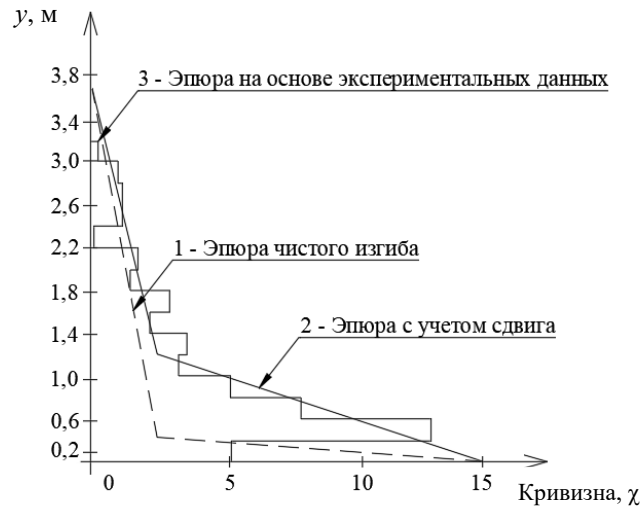


Рис. 2. Эпюры распределения кривизны по высоте стены [2]

Максимальное отличие между эпюрами 1 и 2 составило 31 %, что является существенным.

Для того, чтобы рассчитать компоненты деформаций и перемещений, обусловленные изгибом и сдвигом раздельно, внесем в расчетную схему (рис. 1) некоторые обобщающие уточнения и перейдем к схеме (рис. 3) [4]:

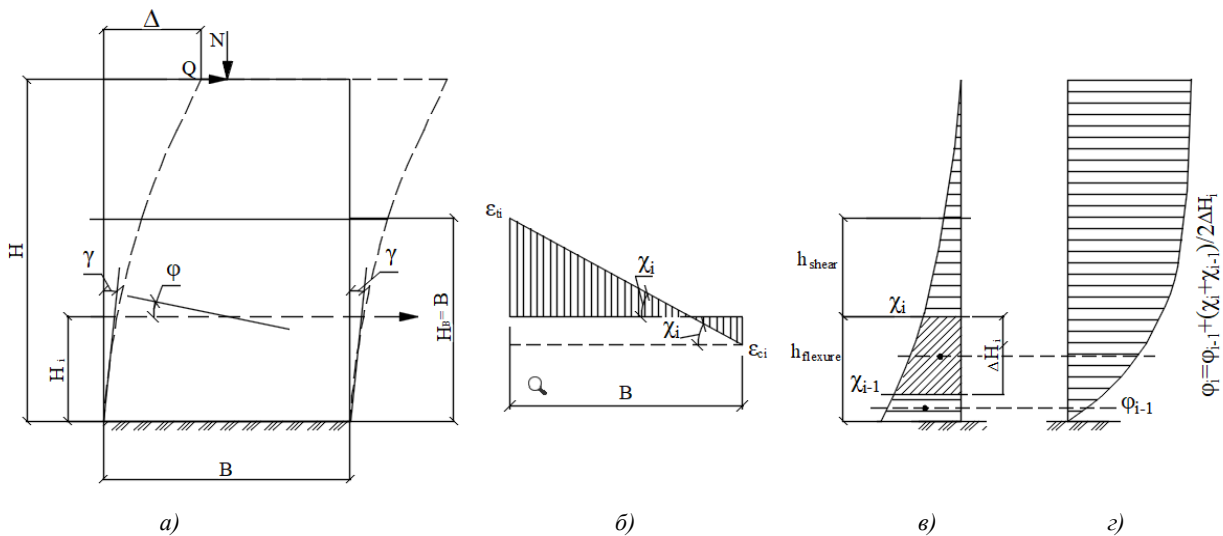


Рис. 3. Расчетные схемы определения углов сдвига, γ , продольных относительных деформаций, ϵ , кривизн, χ , и углов поворота, ϕ , при деформировании стены: а — схема деформирования стены; б — эпюра распределения продольных деформаций ϵ в произвольном i -м сечении стены, проведенном на высоте H_i от основания; в — эпюра распределения кривизны по высоте стены; г — эпюра распределения углов поворота [4]

Для оценки деформаций изгиба рассмотрим эпюру кривизны на рис. 3 в, которая описывается некоторой непрерывной и дифференцируемой функцией $\chi = \chi(y)$. Пусть i — это порядковый номер произвольного поперечного сечения стены, расположенного на высоте H_i от ее низа. В данном сечении эпюра относительных деформаций ϵ стены показана на рис. 3 б, крайние значения на которой связаны с кривизной известной из сопротивления материалов формулой:

$$\chi_i = \frac{|\epsilon_{ti}| + |\epsilon_{ci}|}{B}, \quad (3)$$

где ϵ_{ti} и ϵ_{ci} — деформации растяжения и сжатия на боковых гранях стены шириной B .

Среднее значение кривизны на участке стены высотой ΔH_i , заключенном между двумя близкими сечениями i и $i-1$, есть величина $(\chi_i + \chi_{i-1})/2$. Тогда угол поворота поперечного сечения стены на уровне центра тяжести участка ΔH_i (рис. 3 г) определяется формулой:

$$\varphi_i = \int_0^{H_i} \chi(y) dy = \frac{\varphi_{i-1} + (\chi_i + \chi_{i-1})}{2\Delta H_i}. \quad (4)$$

Искомые перемещения в произвольном i -м сечении определяются по формулам:

$$\Delta_{flexure,i} = \varphi_i H_i, \quad (5)$$

$$\Delta_{shear,i} = \gamma_i H_i, \quad (6)$$

где γ_i — угол сдвига грани стены на высоте от основания (рис. 3 а).

Определить относительные деформации ε_{ti} и ε_{ci} вертикальных граней стены в ходе эксперимента в целом не вызывает трудностей. Для этого можно воспользоваться такими методами, как тензометрия, голографическая интерферометрия и т. п. Поэтому оценить перемещения чистого изгиба $\Delta_{flexure}$ по формулам (3)–(5) довольно просто. А вот с перемещениями чистого сдвига Δ_{shear} возникают сложности [5].

В работах [4, 6–8] для оценки этих перемещений предлагается расчетный метод «Х-диагоналей» (рис. 4). Для этого авторы выделяют квадратный фрагмент стены шириной B и высотой $H_b = B$. Но, по нашему мнению, высота фрагмента может быть произвольной — H_i , что позволит сделать данный метод более универсальным.

Искомые перемещения сдвига Δ_{shear} оцениваются по изменению длин диагоналей выделенного квадрата до деформирования (d) и после деформирования (d_1' , d_2') (рис. 4 а):

$$\Delta_{shear} = \gamma H_B = \left(\frac{d}{2B} \right) (d_1' - d) d - (d_2' - d) H_B. \quad (7)$$

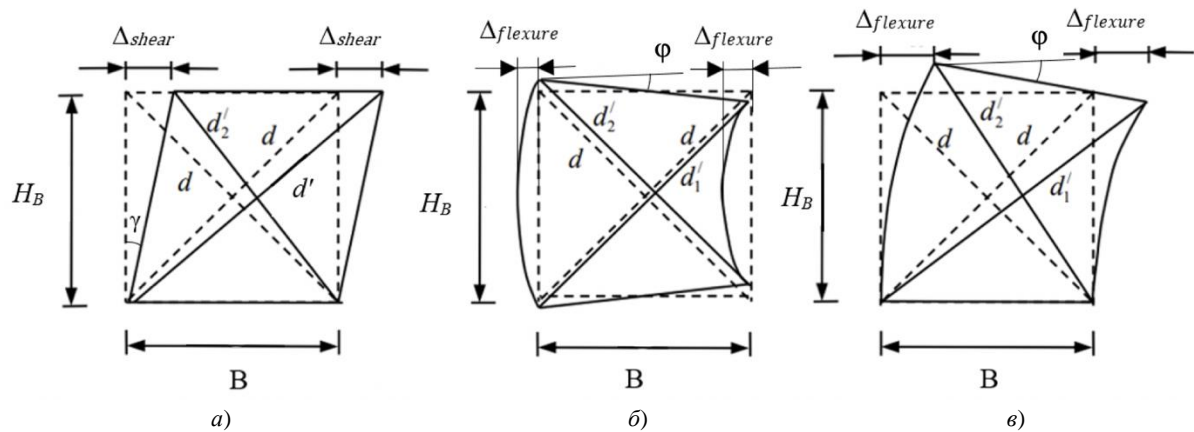


Рис. 4. Геометрические схемы деформирования стены для определения перемещений изгиба $\Delta_{flexure}$ и сдвига Δ_{shear} : а — схема чистого сдвига; б — схема чистого изгиба с постоянной кривизной по высоте; в — схема чистого изгиба с переменной кривизной по высоте [4, 7]

Формула (7) точна лишь в случае постоянства кривизны деформированных граней стены по высоте (рис. 4 б). Такая ситуация возможна на каком-то небольшом (бесконечно малом) участке, в остальных случаях она приводит к заметным погрешностям. Оценка перемещений сдвига Δ_{shear} в таком случае получается завышенной, поскольку содержит в себе еще и перемещения изгиба $\Delta_{flexure}$ (рис. 4 в).

Для уточнения формулы (7) рассмотрим схему деформирования стены на рис. 5 с учетом вертикальных смещений.

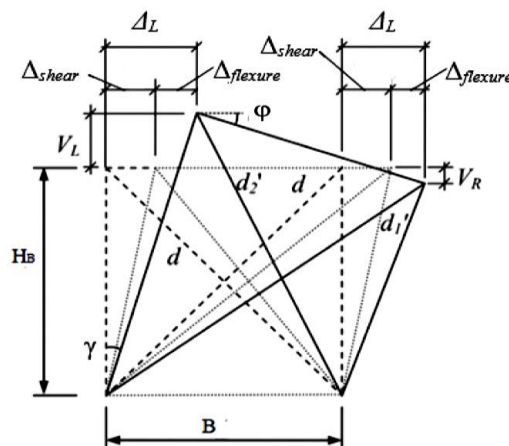


Рис. 5. Перемещения от изгиба $\Delta_{flexure}$ и от сдвига Δ_{shear} с учетом вертикального смещения V_L и V_R [4, 7]

Перемещения при изгибе и угол поворота горизонтального сечения стены φ равны:

$$\Delta_{flexure} = \alpha \varphi H_B, \quad (8)$$

$$\varphi = \frac{V_L - V_R}{L}, \quad (9)$$

где V_L и V_R — вертикальные смещения верхней грани стены по левой и правой стороне соответственно; α — коэффициент, учитывающий изменение кривизны по высоте стены, который определяется формулой (графическую интерпретацию коэффициента см. на рис. 6):

$$\alpha = \frac{\int_0^H \varphi(y) dy}{\varphi H}. \quad (10)$$

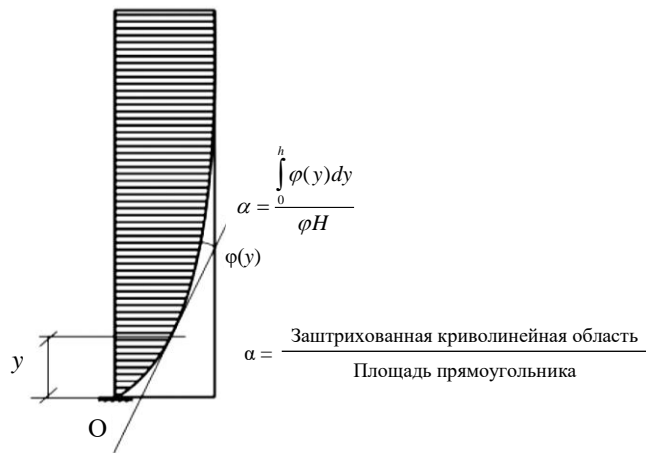


Рис. 6. Схема распределения углов поворота искривленной грани стены после деформирования для определения коэффициента α [4, 7]

Этот коэффициент изменяется в пределах $0,5 < \alpha < 1,0$ и в среднем равен $\alpha \approx 0,62$. Значения α , близкие к границам интервала (0,5; 1,0), являются идеализированной абстракцией, которую можно использовать в теоретических моделях с целью упрощения, но на практике они не реализуются. Смысл коэффициента состоит в том, что чем больше α , тем более податливой к изгибу является конструкция стены, то есть тем меньше у нее изгибная жесткость. И наоборот, чем меньше α , тем более высокой сопротивляемостью к изгибу обладает конструкция стены, то есть тем выше у нее изгибная жесткость.

Уточненные перемещения сдвига равны:

$$\Delta_{shear} = \left(\frac{d}{2B} \right) [(d'_1 - d) - (d'_2 - d)] - \left[\Delta_{flexure} + \left(\frac{H_B}{2B} \right) (V_R - V_L) \right] \quad (11)$$

или

$$\Delta_{shear} = \left(\frac{d}{2B} \right) [(d'_1 - d) - (d'_2 - d)] - (\alpha - 0,5) \varphi H. \quad (12)$$

Таким образом, чтобы получить свой вклад перемещений от изгиба $\Delta_{flexure}$ и сдвига Δ_{shear} в общие перемещения Δ , необходимо определить коэффициент α , учитывающий изменение кривизны по высоте стены. Причем при $\alpha = 0,5$ формула (12) приводится к (7), то есть в таком случае градиент изгибной кривизны перестает оказывать влияние на сдвиг.

Результаты экспериментов [4, 7] выявили, что до образования трещин кривизна стен имеет почти постоянное распределение по высоте, соответственно, коэффициент $\alpha \approx 0,5$. С появлением трещин эпюра распределения кривизны становится треугольной, а коэффициент α увеличивается примерно до 0,67. С дальнейшим увеличением нагрузки α также растет и стремится к 1,0 в момент разрушения, которое сопровождается сначала исключением вертикальной арматуры из работы, а затем выкрашиванием сжатого бетона.

Также установлено, что с увеличением соотношения сторон стены H/B значение α снижается.

В статье [9] приводится стержневая модель расчета стены с учетом податливости опорных узлов A и B (рис. 7) при совместном действии продольной N и поперечной Q сил. Первоначально схема использовалась для расчета колонн, но в данном случае применяется для моделирования железобетонных стен с соотношением сторон $1,5 < H/B < 2,0$ с целью получения перемещений изгиба $\Delta_{flexure}$ и сдвига Δ_{shear} по отдельности.

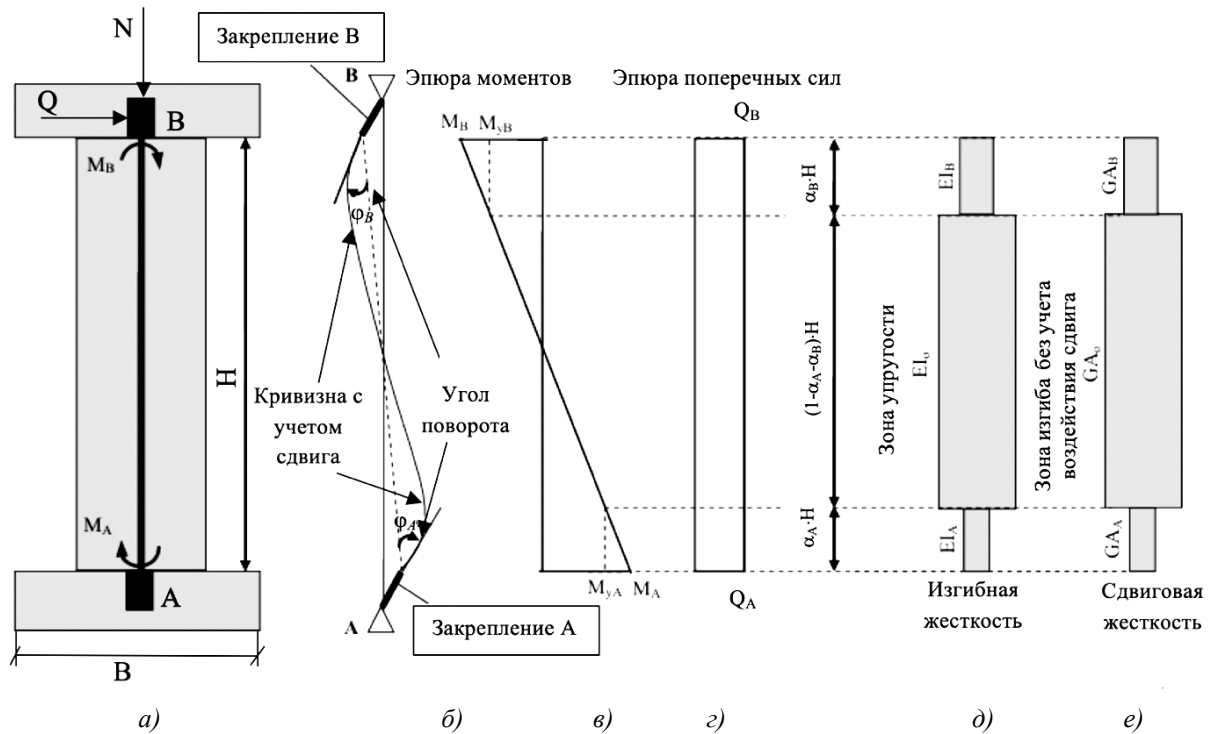


Рис. 7. Стержневая расчетная схема деформирования железобетонной стены при совместном действии вертикальной N и горизонтальной Q нагрузки: а — стержневая модель расчета стены; б — схема искривления продольной оси стержня при деформировании; в — эпюра моментов; г — эпюра поперечных сил; д — схема моделирования изгиба стены; е — схема моделирования стены с учетом взаимодействия сдвига и изгиба [9]

Схема представляет собой стержень, защемленный в верхней и нижней части — в точках A и B (рис. 7 а). Схема деформирования стержня показана на рис. 7 б. На рис. 7 в и рис. 7 г представлены соответственно эпюры моментов и поперечных сил.

Для определения кривизны продольной оси стержня $\chi_{flexure}$, вызванной изгибом, распределение изгибной жесткости EI по высоте стены представляется как показано на рис. 7 д. Для определения кривизны оси стержня χ_{shear} , вызванной сдвигом, распределение сдвиговой жесткости GA по высоте стены представляется как показано на рис. 7 е. По концам стержня для одной и другой жесткости предполагается учет физической нелинейности железобетона (жесткости EI_A и EI_B , GA_A и GA_B на рисунках). В средней части стержня жесткости принимаются как для упругого тела (жесткости EI_0 , GA_0). При этом на каждом из трех участков жесткости принимают постоянное значение.

Длины концевых участков стержня, в границах которых учитывается физическая нелинейность, определяются умножением высоты стены H на эмпирические коэффициенты α_A и α_B . Точки, отделяющие концевые участки от середины, являются пластическими шарнирами.

Сдвиговые перемещения Δ_{shear} принимают заметные значения на концевых участках стержня, в средней части практически не проявляются, здесь преобладают перемещения $\Delta_{flexure}$, вызванные изгибом.

Общее перемещение стены Δ в области пластического шарнира равно:

$$\Delta = \Delta_{shear} + \Delta_{flexure} \quad (13)$$

В исследованиях [6–7, 10–12] рассматривается определение перемещений чистого изгиба $\Delta_{flexure}$ и перемещений чистого сдвига Δ_{shear} в составе общего перемещения Δ при соотношении сторон стены $1,5 < H/B < 2,0$. Показано, что в таких стенах преобладают изгибные перемещения $\Delta_{flexure}$, а перемещения горизонтального скольжения Δ_{slid} составляют порядка 1 % от Δ и ими можно пренебречь. Доля перемещений от изгиба $\Delta_{flexure}$ составляет приблизительно 98 % от общего перемещения Δ железобетонной стены на начальных этапах. С увеличением горизонтальной нагрузки Q вклад перемещений от изгиба $\Delta_{flexure}$ постепенно снижался до 90 % в момент появления трещин; 85 % — при текучести вертикальной арматуры; 80 % — в стадии разрушения (при выкрашивании сжатого бетона).

По результатам обработки экспериментов [6, 7] нами получены графики относительных перемещений стены при соотношении сторон $1,5 < H/B < 2,0$, которые показаны на рис. 8 а. Видно, что в стадии разрушения доля перемещений при изгибе и сдвиге составляет соответственно 88 % и 12 % от общих.

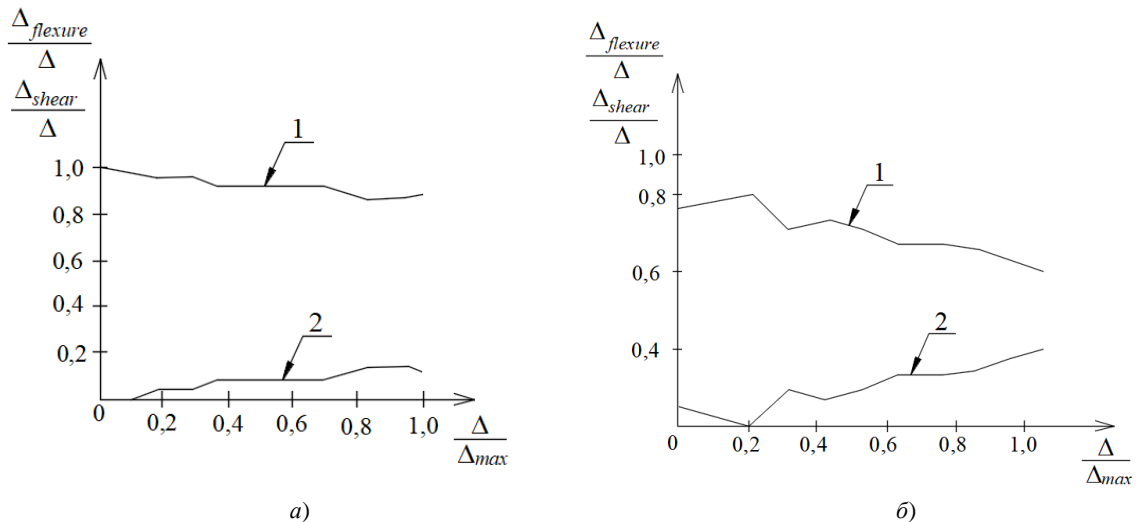


Рис. 8. Графики относительных перемещений стены при соотношении сторон: *a* — $1,5 < H/B < 2,0$; *б* — $1,0 < H/B < 1,5$ (1 — кривая относительных перемещений изгиба $\Delta_{flexure}/\Delta_{max}$; 2 — кривая относительных перемещений сдвига $\Delta_{shear}/\Delta_{max}$; Δ_{max} — максимальные перемещения стены)

Аналогичные графики получены нами после обработки данных [6] (рис. 8 *б*) для стен с соотношением сторон $1,0 < H/B < 1,5$. Установлено, что перемещение Δ_{shear} оказывает значительное влияние на общее перемещение Δ . Доля Δ_{shear} на начальных этапах нагружения составляет около 22 %, в момент отслоения защитного слоя бетона — 46 % и достигает 64 % в момент разрушения.

В эксперименте [6] показано, что на начальных этапах нагружения в образцах наблюдаются незначительные перемещения $\Delta_{flexure}$ (рис. 9 *а*). С появлением первой трещины изгибная жесткость стены резко снижается, что приводит к значительному увеличению перемещений $\Delta_{flexure}$.

На рис. 9 *б* показано, что с появлением первой наклонной трещины перемещения Δ_{shear} начинают оказывать более значительное влияние на общие перемещения стены Δ , несмотря на то, что прочность стен на сдвиг более чем в 2 раза превосходит горизонтальную нагрузку Q .

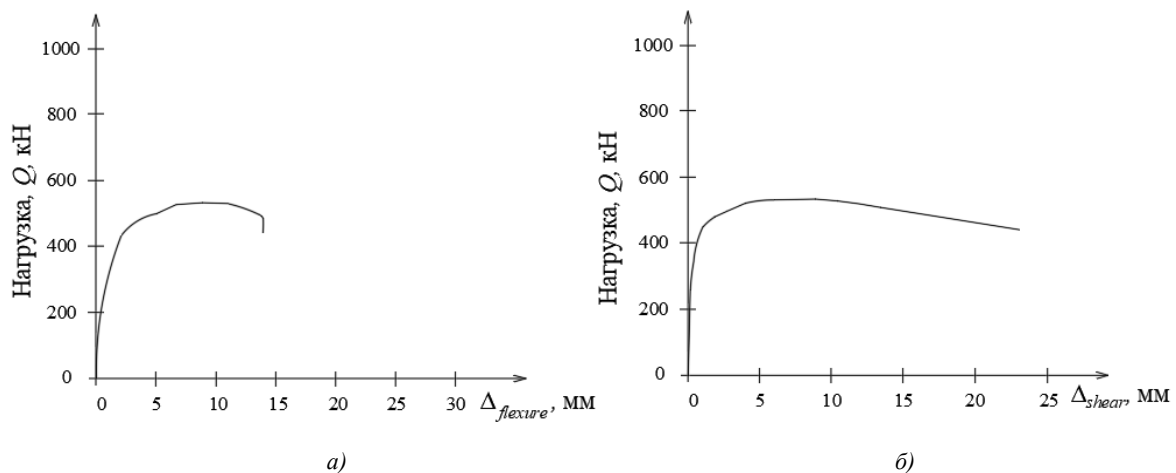


Рис. 9. Графики зависимости перемещений от изгиба $\Delta_{flexure}$ (*а*) и от сдвига Δ_{shear} (*б*) стены от приложенной горизонтальной нагрузки Q [6]

Обсуждение и заключение. Механизмы деформирования и разрушения стен под нагрузкой, выявленные в экспериментах разных зарубежных авторов, позволили нам построить соответствующие для них схемы деформирования с наложением схемы внутренних усилий, уравнивающих внешние нагрузки. Это дало возможность получить математические формулы для определения общих перемещений стены Δ на характерных ее участках, а также зависимости, позволяющие вычлнять из общих перемещений составляющие, вызванные влиянием деформаций изгиба $\Delta_{flexure}$ и сдвига Δ_{shear} .

Схема на рис. 1 позволяет определить искомые перемещения сдвига Δ_{shear} и изгиба $\Delta_{flexure}$ при совместном действии вертикальной, N , и горизонтальной, Q , нагрузки. Приводятся теоретические эпюры кривизны нейтральной оси стены, где сплошная линия соответствует полной кривизне, определенной при совместном

учете изгибных и сдвиговых деформаций, пунктирная — только при учете изгиба без сдвига. Выявлено, что максимальное отличие между эпюрами чистого изгиба и эпюры с учетом сдвига составляет 31 %, что говорит о том, что расчет стен по модели внецентренно сжатого стержня без учета сдвиговых перемещений будет иметь значительную погрешность.

Схема на рис. 3 позволяет рассчитать компоненты деформаций и перемещений, обусловленные изгибом и сдвигом раздельно, но с некоторыми обобщающими уточнениями. Перемещения чистого изгиба $\Delta_{flexure}$ определяются по достаточно простым формулам, а вот с перемещениями чистого сдвига Δ_{shear} возникают сложности. Для оценки этих перемещений предлагается расчетный метод «Х-диагоналей». Но, чтобы получить свой вклад перемещений от изгиба $\Delta_{flexure}$ и сдвига Δ_{shear} в общие перемещения Δ , необходимо выполнить арифметически сложные действия для нахождения коэффициента α , учитывающего изменение кривизны по высоте стены.

Первоначально схема на рис. 7 использовалась для расчета колонн, но в данном случае применяется для моделирования железобетонных стен с соотношением сторон $1,5 < H/B < 2,0$ с целью получения перемещений изгиба $\Delta_{flexure}$ и сдвига Δ_{shear} . Для внедрения данной схемы в вычислительный комплекс требуется провести масштабные экспериментальные и теоретические исследования на более сложных (более точных) моделях стен.

В результате проведенного теоретического исследования установлено, что схема, представленная на рис. 1, обеспечивает более точное описание работы конструкции стены и может быть использована в качестве практического инструмента для анализа ее напряженно-деформированного состояния при совместном действии вертикальной силы N и горизонтальной силы Q .

Список литературы/ References

1. Радайкин О.В., Хнычева Н.В. Влияние различных факторов на прочность, жесткость и трещиностойкость монолитных железобетонных стен гражданских зданий: классификация факторов, влияние геометрических параметров и соотношения нагрузок. *Инженерный вестник Дона*. 2024;11. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2024/9634> (дата обращения 08.06.2025).
2. Radaykin OV, Khnycheva NV Influence of Various Factors on the Strength, Rigidity and Crack Resistance of Monolithic Reinforced Concrete Walls of Civil Buildings: Classification of Factors, Influence of Geometric Parameters and Load Ratios. *Engineering Journal of Don*. 2024;11. (In Russ.) URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2024/9634> (accessed: 08.06.2025).
3. Schuler H. Flexural and Shear Deformation of Basement-Clamped Reinforced Concrete Shear Walls. *Materials*. 2024;17(10):2267. <https://doi.org/10.3390/ma17102267>
4. Schuler H, Meier F, Trost B. Influence of the tension shift effect on the force–displacement curve of reinforced concrete shear walls. *Engineering Structures*. 2023;274:115144. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115144>
5. Mohamed N, Farghaly AS, Benmokrane B, Neale KW. Flexure and Shear Deformation of GFRP-Reinforced Shear Walls. *Journal of Composites for Construction*. 2013;18(2). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000444](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000444)
6. Massone LM, Orakcal K, Wallace JW. Shear-Flexure Interaction for Structural Walls. In book: *SP-236, ACI Special Publication — Deformation Capacity and Shear Strength of Reinforced Concrete Members Under Cyclic Loading*. 2006. P. 127–150. URL: <https://www.researchgate.net/publication/284079633> (дата обращения 08.06.2025).
7. Mohamed N. *Strength and Drift Capacity of Gfrp-Reinforced Concrete Shear Walls*. Canada: University of Sherbrooke; 2013. 155 p. URL: https://www.academia.edu/79574653/Strength_and_Drift_Capacity_of_Gfrp_Reinforced_Concrete_Shear_Walls (дата обращения 08.06.2025).
8. Arafa A. *Assessment of strength, stiffness and deformation capacity of concrete squat walls reinforced with GFRP Bar*. Canada: Sohag University; 2017. 223 p. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.16345.06245>
9. Kolozvari KI. *Analytical Modeling of Cyclic Shear — Flexure Interaction in Reinforced Concrete Structural Walls*. Los Angeles: University of California; 2013. 334 p. URL: <https://escholarship.org/uc/item/6sm78634> (дата обращения 08.06.2025).
10. Mergos PE, Beyer K. Modelling shear-flexure interaction in equivalent frame models of slender RC walls. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*. 2013; 23(15):1171–1189. <https://doi.org/10.1002/tal.1114>
11. Hiraishi H. Evaluation of shear and flexural deformations of flexural type shear walls. *Bulletin of the New Zealand National society for Earthquake Engineering*. 1984;17(2):135–144. <https://doi.org/10.5459/bnzsee.17.2.135-144>
12. Beyer K, Dazio A, Priestley MJN. Shear Deformations of Slender Reinforced Concrete Walls under Seismic Loading. *ACI Structural Journal*. 2011;108(2):167–177. URL: <https://www.researchgate.net/publication/286384751> (accessed: 08.06.2025).
13. Mohamed N, Farghaly AS, Benmokrane B, Neale KW. Experimental investigation of concrete shear walls reinforced with glass-fiber-reinforced bars under lateral cyclic loading. *Journal of Composites for Construction*. 2014;18(3). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000393](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000393)

Об авторах:

Радайкин Олег Валерьевич, доктор технических наук, профессор кафедры энергообеспечения предприятий, строительства зданий и сооружений Казанского государственного энергетического университета (420066, Российская Федерация, г. Казань, ул. Красносельская, 51), доцент кафедры конструктивно-дизайнерского проектирования Казанского (Приволжского) федерального университета (420008, Российская Федерация, г. Казань, ул. Кремлевская, 18/1), [ORCID](#), olegxxii@mail.ru

Хнычева Надежда Вячеславовна, аспирант кафедры энергообеспечения предприятий, строительства зданий и сооружений Казанского государственного энергетического университета (420066, Российская Федерация, г. Казань, ул. Красносельская, 51), [ORCID](#), vartsk@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

О.В. Радайкин: формирование идеи, формулировка цели и ключевых задач.

Н.В. Хнычева: сбор данных, их анализ и интерпретация, оформление.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Oleg V. Radaikin, D.Sci. (Eng.), Professor of the Department of Energy Supply of Enterprises, Construction of Buildings and Structures, Kazan State Power University (51 Krasnoselskaya Str., Kazan, 420066, Russian Federation), Associate Professor of the Department of Structural and Design Engineering, Kazan (Volga Region) Federal University (18/1 Kremlevskaya Str., Kazan, 420008, Russian Federation), [ORCID](#), olegxxii@mail.ru

Nadezhda V. Khnycheva, PhD Student, Department of Energy Supply of Enterprises, Construction of Buildings and Structures, Kazan State Power Engineering University (51 Krasnoselskaya Str., Kazan, 420066, Russian Federation), [ORCID](#), vartsk@gmail.com

Claimed Contributorship:

OV Radaikin: development of the idea, aims and objectives of the study.

NV Khnycheva: data collection, analysis and interpretation, manuscript preparation.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final version of manuscript.

Поступила в редакцию / Received 05.07.2025

Поступила после рецензирования / Revised 20.07.2025

Принята к публикации / Accepted 05.08.2025