

# ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

УДК 693.22:624.04

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-177-187

*С.В. ЮЩУБЕ, И.И. ПОДШИВАЛОВ, А.А. ТАРАСОВ,*

*Томский государственный архитектурно-строительный университет*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КИРПИЧНОГО ЗДАНИЯ НА СВАЙНОМ ФУНДАМЕНТЕ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НЕОБХОДИМОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЖЕСТКОСТИ**

**Аннотация.** Объектом исследования является пятиэтажное протяженное кирпичное здание на свайном фундаменте, получившее значительные деформации.

Цель работы – восстановление эксплуатационной пригодности здания после выполнения инструментального обследования.

При строительстве, а затем и при эксплуатации здания, вследствие недопогружения отдельных свай до гравийно-галечникового слоя в сложных инженерно-геологических условиях площадки, была нарушена пространственная жесткость здания с образованием трещин в кирпичных стенах и в ростверке свайного фундамента.

По результатам обследования было выполнено моделирование напряженно-деформированного состояния здания в ПК МiсгоFe с разработкой расчетной модели в системе «основание – фундамент – здание».

Полученные результаты позволили разработать рекомендации по обеспечению необходимой пространственной жесткости здания путем усиления с внешней стороны наружных стен напрягаемыми стальными стержнями, расположенными в уровне междуэтажных перекрытий.

**Ключевые слова:** здание, стены, свайный фундамент, неравномерные осадки, деформации, расчетная модель, усиление, пространственная жесткость

**Для цитирования:** Ющубе С.В., Подшивалов И.И., Тарасов А.А. Моделирование напряженно-деформированного состояния кирпичного здания на свайном фундаменте для обеспечения необходимой пространственной жесткости // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 4. С. 177–187.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-177-187

S.V. YUSHCHUBE, I.I. PODSHIVALOV, A.A. TARASOV,  
Tomsk State University of Architecture and Building

## STRESS-STRAIN STATE MODELING OF BRICK BUILDING ON PILE FOUNDATION TO PROVIDE SPATIAL RIGIDITY

**Abstract.** *Purpose:* The aim of this work is the instrument-aided structural survey to recover the operability of a five-storey brick building on a pile foundation after significant deformation. *Methodology:* The MicroFe software is used to simulate the stress-strain state of the building and develop the base–foundation–building system model. *Research findings:* During both construction and operation of the building, its spatial stiffness is disturbed with the crack formation in brick walls due to insufficient pile installation, i.e., the pebble-gravel layer is not reached owing to difficult engineering and geological conditions. *Practical implications:* The obtained results are used to develop recommendations to ensure the required spatial stiffness of the building by the outer wall reinforcement with strained steel bars locating at the level of intermediate floors.

**Keywords:** building, walls, pile foundation, differential settlement, deformation, design model; strengthening; spatial stiffness

**For citation:** Yushchube S.V., Podshivalov I.I., Tarasov A.A. Modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya kirpichnogo zdaniya na svainom fundamente dlya obespecheniya neobkhodimoi prostranstvennoi zhestkosti [Stress-strain state modeling of brick building on pile foundation to provide spatial rigidity]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2022. V. 24. No. 4. Pp. 177–187.  
DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-177-187

При проведении геотехнического мониторинга здания, получившего значительные неравномерные осадки свайного фундамента, как правило, выполняются следующие работы: инструментальное обследование строительных конструкций и фундамента; геодезические измерения деформаций здания; дополнительные инженерно-геологические изыскания; поверочные расчеты [1]. По результатам выполненных работ предлагаются рекомендации по восстановлению эксплуатационной пригодности здания [2].

Экспериментальные исследования кирпичной кладки на действие статической сжимающей нагрузки, приложенной по диагонали фрагмента кирпичной кладки, показали, что при его нагружении, в процессе перераспределения внутренних усилий, преобладающее значение получили главные растягивающие деформации, которые оказались основной причиной разрушения испытуемых образцов [3, 4].

В работе [5] представлена методика расчета каменной кладки на основе теории сопротивления анизотропных материалов, которая позволяет выявить особенности напряженно-деформированного состояния и характера разрушения конструкций из каменной кладки.

Численные исследования, выполненные на основе разработанной дискретной модели каменной кладки, позволяют оценить степень влияния деформационного или прочностного параметров на схему упругопластического деформирования модели, а также определить резервы несущей способности каменных конструкций [6].

К вопросу усиления каменных конструкций: в статье [7] приведены результаты экспериментальных исследований фрагментов каменной кладки по влиянию композитных материалов на основе углеродных волокон на несущую способность и деформативность при действии статической нагрузки, где определен механизм работы усиленных образцов и влияние элементов усиления на изменение несущей способности каменной кладки.

С использованием ПК ANSYS Workbench в работе [8] проведен анализ напряженно-деформированного состояния кирпичной кладки, усиленной двухсторонним бетонным наращиванием с использованием объемных конечных элементов кладки.

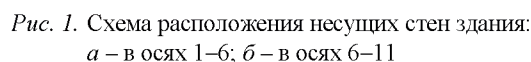
Моделирование взаимодействия надземных конструкций и свайных фундаментов с основанием здания в настоящее время является достаточно актуальным [9]. В качестве основных критериев рассматриваются деформации (осадки) здания в целом [10, 11]. В соответствии с результатами мониторинга и выполненного моделирования напряженно-деформированного состояния здания распределение усилий и деформаций рекомендуется определять на основании расчетов в пространственной постановке в системе «основание – фундамент – здание» [12].

Рассматриваемое пятиэтажное кирпичное здание с техническим подпольем было введено в эксплуатацию в 1970 г. Здание прямоугольной формы в плане с габаритными размерами 70,89×12,85 м (рис. 1). Высота наружных стен толщиной 640 мм и внутренних стен толщиной 380 мм составляет 15,75 м. По конструктивной схеме оно выполнено с продольными несущими стенами, с поперечными капитальными стенами в трех лестничных клетках и с горизонтальными железобетонными дисками перекрытий.

При обследовании было выявлено, что фундаменты здания ленточного типа с ростверком высотой 500 мм, шириной 400 и 600 мм соответственно под внутренние и наружные стены на сборных железобетонных забивных сваях с поперечным сечением 300×300 мм, расположенных в один ряд с шагом 1,5 м. Длина свай составляет 11 м. Кроме того, в осях А–В, 1–5 существующие фундаменты были усилены дополнительными сваями с шагом 3,0 м между основными сваями (через каждые две сваи). Сваи усиления выполнены из коротких стальных труб диаметром 325 мм, соединенных между собой на сварке. Внутренняя полость свай заполнена бетоном. С существующим ростверком сваи усиления объединены через монолитный железобетонный оголовок. Усиление фундаментов стальными трубами могло быть выполнено либо на стадии строительства, либо после его окончания.

В ходе освидетельствования фундамента, по данным пройденных шурфов, были обнаружены вертикальные силовые трещины в ростверке, пространственное положение которых совпадает с вертикальными трещинами в кирпичных стенах здания. Характер и месторасположение трещин в ростверке и в стенах позволяют утверждать, что основная причина их появления – неравномерные и сверхнормативные осадки свайного фундамента. Такое техническое состояние здания принято в качестве исходного.

Геодезическими измерениями были определены отклонения продольной стены по оси А от условного горизонтального положения по длине здания и горизонтальные отклонения углов здания от вертикали [2].



Из анализа конструктивной схемы здания и инженерно-геологических условий площадки в ПВК MicroFe была разработана расчетная модель, в которой кирпичные стены, диски перекрытий и ростверк моделировались конечным элементом типа «плоский прямоугольный элемент оболочки», сваи моделировались конечным элементом типа «стержень». Грунтовое основание под ростверком принималось в виде семислойного основания с фактическим наклонным и клиновидным расположением слоев из объемных конечных элементов с послойным заданием модуля деформации, коэффициента Пуассона, плотности, сцепления, угла внутреннего трения (без учета дилатансии).

коэффициента всестороннего сжатия (принят равным нулю). Сопряжение свай с ростверком принималось жестким. Расчеты выполнялись с учетом нелинейной работы грунта основания по модели Кулона – Мора. Материал кирпичной кладки стен задавался как ортотропный, в котором модули упругости кладки в горизонтальном и вертикальном направлениях стен составляли  $E_1 = 1,2 \cdot 10^6$  кН/м<sup>2</sup> и  $E_2 = 5,85 \cdot 10^6$  кН/м<sup>2</sup> соответственно. Коэффициенты Пуассона в горизонтальном и вертикальном направлениях стен приняты  $\mu_1 = 0,04$  и  $\mu_2 = 0,2$  соответственно. Расчетные характеристики кирпичной кладки:  $R_c = 1,5$  МПа;  $R_p = 0,12$  МПа;  $R_{cp} = 0,49$  МПа;  $R_{изг} = 0,23$  МПа. Расчетная конечно-элементная модель здания и ее визуализация приведены на рис. 2.

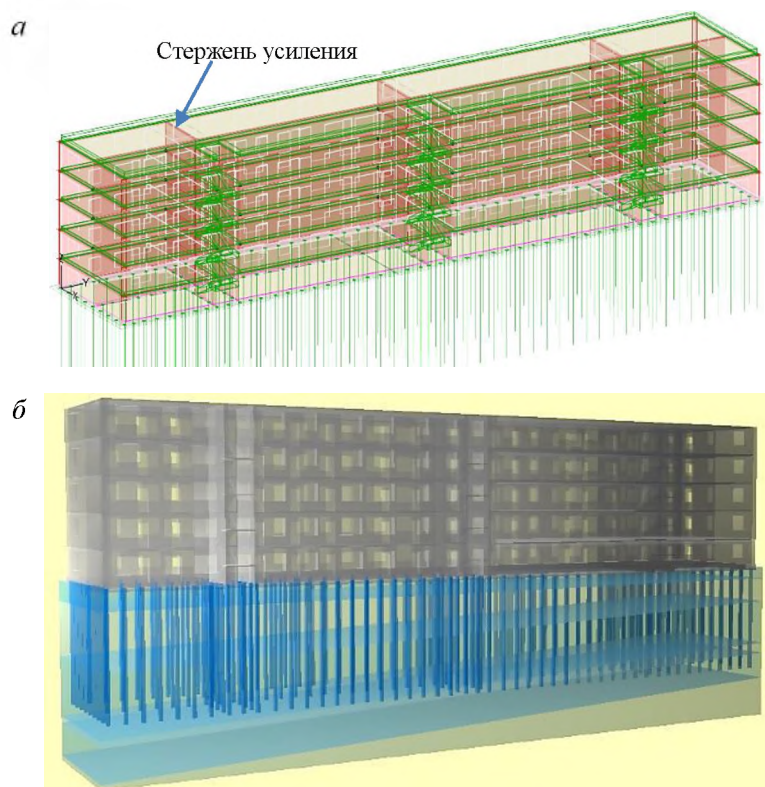


Рис. 2. Расчетная модель здания (а) и ее визуализация (б)

В расчетной модели рассматривались две расчетные схемы:

– расчетная схема № 1 – надземная часть с вертикальными трещинами в стенах и в ростверке на железобетонных сваях и на стальных сваях усиления. Расчет кирпичной кладки стен выполнялся в нелинейной постановке по теории предельных поверхностей с определением несущей способности кирпичной кладки стен по методике, приведенной, например, в работе [13]. Для кирпичных стен здания в координатах  $N - M$  были построены области прочности нормальных сечений, по которым назначались группы кирпичных стен по несущей способности и выполнялся статический расчет;

– расчетная схема № 2 – надземная часть принята такой же, как и в расчетной схеме № 1. Расчет кирпичной кладки стен также выполнялся в нелинейной постановке по теории предельных поверхностей с добавлением в уровне междуэтажных дисков перекрытий контурных стальных напрягаемых стержней усиления Ø25 мм с величиной натяжения  $P = 85$  кН, которое может быть обеспечено с помощью стяжных муфт.

В расчетной схеме № 1 изополя коэффициента использования по несущей способности наружных стен приведены на рис. 3, из которого видно, что его наибольшая величина равна  $\text{Max } k = 1,9908 > 1$ . Таким образом, несущая способность наружных стен не обеспечена, и необходимо их усиление с целью увеличения пространственной жесткости.

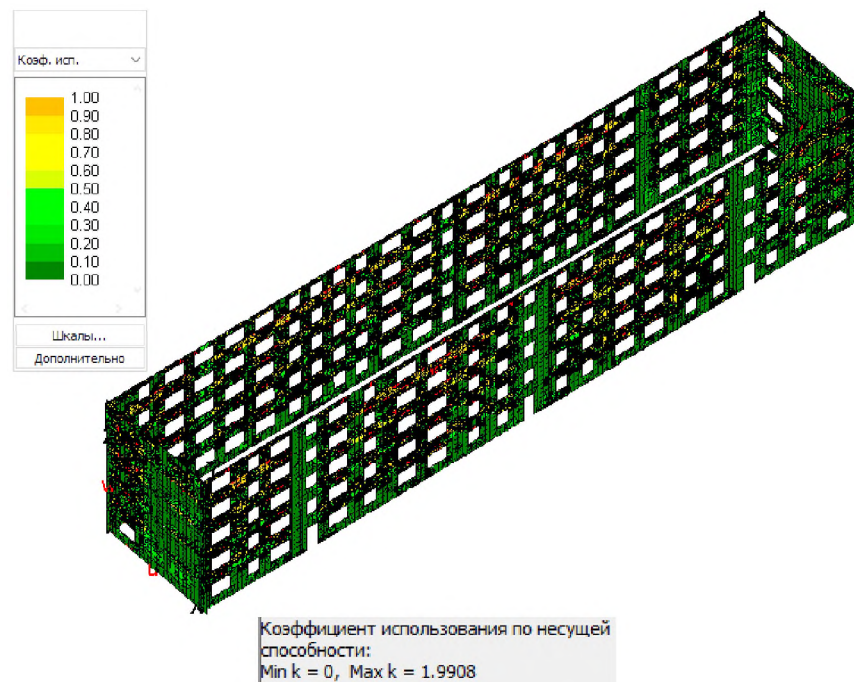


Рис. 3. Изополя коэффициента использования по несущей способности наружных стен в расчетной схеме № 1

В расчетной схеме № 2 изополя коэффициента использования по несущей способности наружных стен даны на рис. 4, из которого видно, что его величина равна  $\text{Max } k = 0,993593 < 1$ . Следовательно, несущая способность наружных стен при усилении контурными (в уровне междуэтажных перекрытий) напрягаемыми стальными стержнями Ø 25 мм будет обеспечена.

Представляет интерес распределение главных напряжений в срединной плоскости наружных стен (рис. 5). Наибольшие главные растягивающие напряжения в кладке составляют  $\sigma_{\text{гл. p}} = 0,56$  МПа  $> R_p = 0,12$  МПа (возможно появление микротрещин в локальных областях кладки), максимальные главные сжимающие напряжения в кладке равны  $\sigma_{\text{гл. с}} = 0,40$  МПа  $< R_c = 1,5$  МПа.



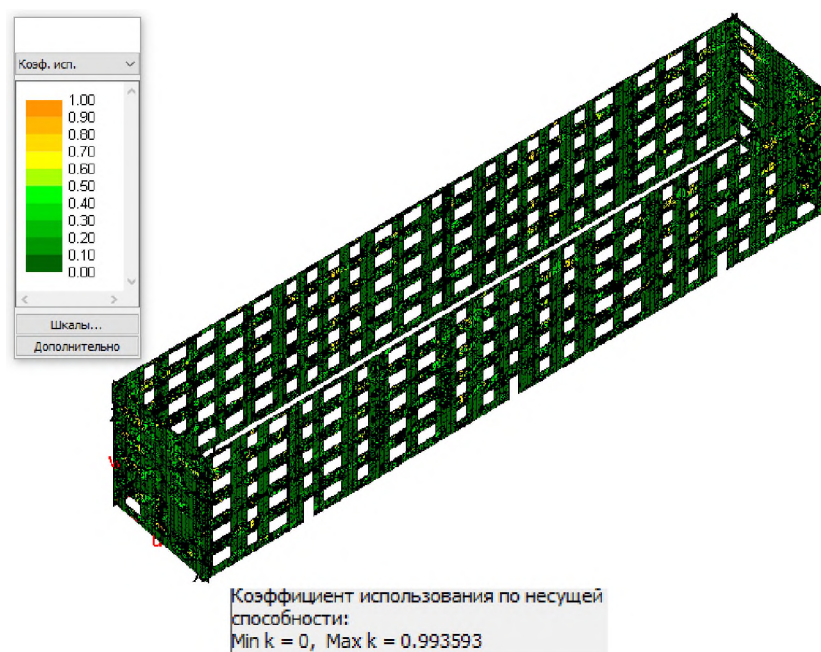


Рис. 4. Изополю коэффициента использования по несущей способности наружных стен в расчетной схеме № 2 после усиления

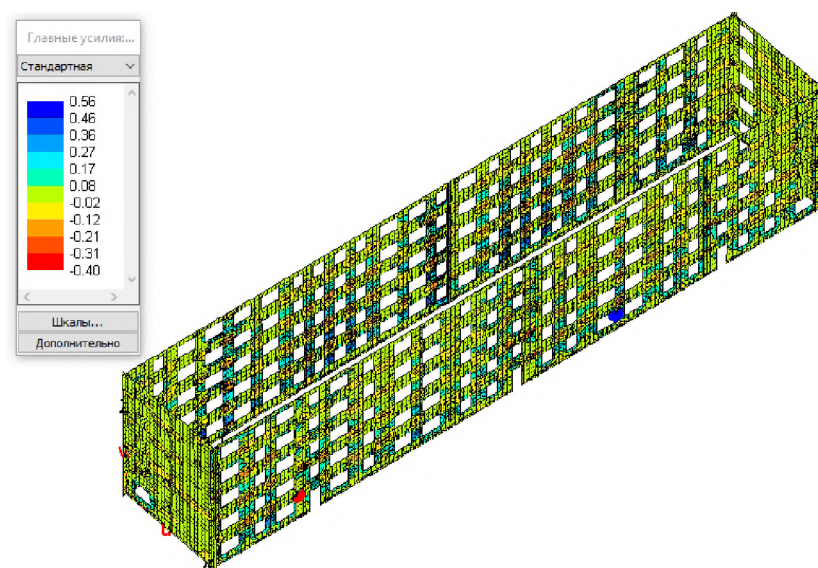


Рис. 5. Изополю главных напряжений (МПа) в срединной плоскости наружных стен в расчетной схеме № 2 после усиления

Изополю вертикальных и горизонтальных перемещений наружных стен после усиления представлены на рис. 6 и 7. Расчетная относительная разность

вертикальных перемещений наружной продольной стены по оси  $A$  на участке здания между осями 1–5 составила 0,001, что в два раза меньше предельно допустимого значения  $(\Delta s/L)_u = 0,002$ .

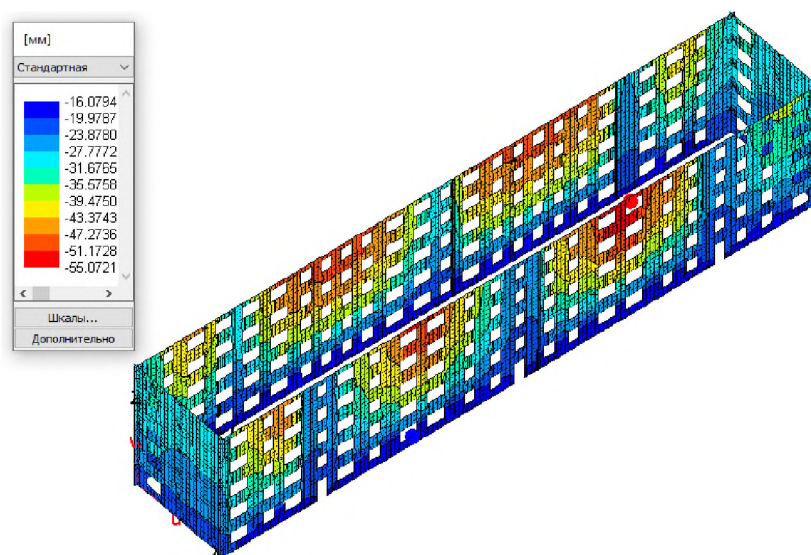


Рис. 6. Изополя вертикальных перемещений наружных стен в расчетной схеме № 2 после усиления

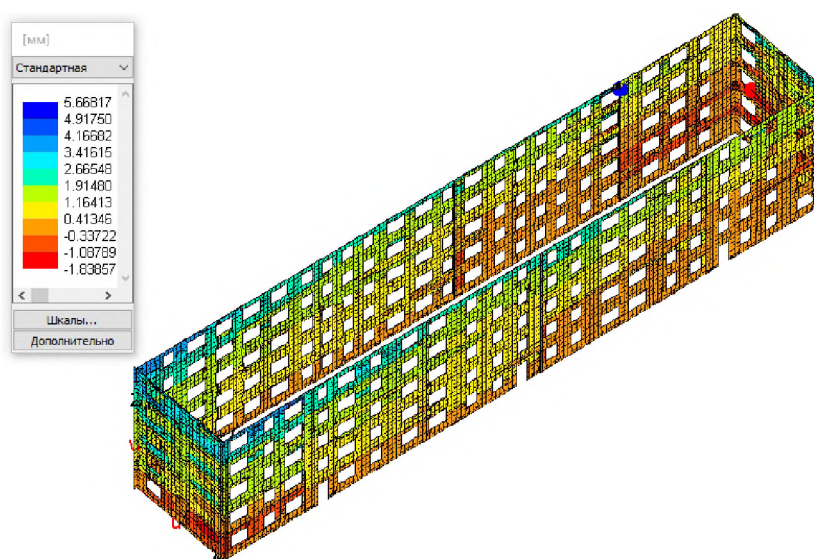


Рис. 7. Изополя горизонтальных перемещений наружных стен по оси  $X$  (в поперечном направлении здания) в расчетной схеме № 2 после усиления

Отклонения наружных стен из плоскости от вертикали достигают 5,3 мм. Горизонтальные предельные перемещения стен ограничиваются вели-



чиной  $f_u = h/500 = 15750/500 = 31,5$  мм, где  $h$  – высота наружных стен. Следовательно, расчетные отклонения стен из плоскости не превышают горизонтальные предельно допустимые пересечения стен для рассматриваемого типа многоэтажных зданий.

В заключение можно отметить, что измеренные при проведении мониторинга вертикальные перемещения стены по оси А с максимальным значением, равным 848 мм, не являются результатом осадки свайного фундамента в классическом понимании, а выступают лишь следствием фактического залегания опорного гравийно-галечникового слоя.

Перед усилением свайного фундамента следует обеспечить необходимую пространственную жесткость здания путем устройства контурных напрягаемых стальных стержней Ø 25 мм в уровне междуэтажных перекрытий с внешней стороны наружных стен здания.

После создания необходимой пространственной жесткости адекватное техническое состояние здания, обеспечивающее его эксплуатационную пригодность, будет достигнуто после усиления существующего фундамента металлическими сваями с опиранием на гравийно-галечниковый грунт.

Если в результате длительной эксплуатации здания нижние концы всех свай достигли гравийно-галечникового слоя и не наблюдается дальнейшего накопления осадок, усиление свайного фундамента можно не производить.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пономарев А.Б., Захаров А.В., Сазонова С.А., Калюшина С.В., Безгодов М.А., Шенкман Р.И., Золотозубов Д.Г. Геотехнический мониторинг жилого дома // *Жилищное строительство*. 2015. № 9. С. 41–45.
2. Ющубе С.В., Подшивалов И.И., Тарасов А.А., Лобанов А.А., Лазарев В.М. Оценка надежности кирпичного здания на свайном фундаменте в условиях развития неравномерных осадок // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2022. Т. 24. № 1. С. 202–215.
3. Копаница Д.Г., Усеинов Э.С., Устинов А.М. Деформации и разрушение фрагмента каменной кладки при кратковременном действии сжимающей статической нагрузки // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2015. № 6. С. 90–97.
4. Деркач В.Н., Белов В.В. Прочность каменной кладки на растяжение под углом к горизонтальным растворным швам // *Вестник гражданских инженеров*. 2012. № 2. С. 65–70.
5. Соколов Б.С., Антаков А.Б. Результаты исследований каменных и армокаменных кладок // *Вестник МГСУ*. 2014. № 3. С. 99–106.
6. Кабанцев О.В. Дискретная модель каменной кладки в условиях двухосного напряженного состояния // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2015. № 4. С. 113–133.
7. Тонких Г.П., Осипов П.В., Темиразулы Г., Федоров С.К. Экспериментальные исследования каменной кладки, усиленной композитными материалами на основе углеродного волокна // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2017. № 2. С. 98–111.
8. Новожилова Н.С. Исследование напряженного состояния кирпичных стен, усиленных бетонным наращиванием при местном сжатии // *Вестник гражданских инженеров*. 2021. № 6 (89). С. 34–41.
9. Шашкин В.А. Эффекты взаимодействия оснований и сооружений // *Развитие городов и геотехническое строительство*. 2012. № 14. С. 141–167.

10. Шашкин А.Г., Шашкин К.Г. Взаимодействие здания и основания: методика расчета и практическое применение при проектировании / под ред. В.М. Улицкого. Санкт-Петербург : Стройиздат, 2002. 48 с.
11. Кабанцев О.В., Тамразян А.Г. Учет изменений расчетной схемы при анализе работы конструкции // Инженерно-строительный журнал. 2014. № 5. С. 15–26.
12. Ющубе С.В., Подшивалов И.И., Филиппович А.А., Тряпitsин А.Е. Моделирование напряженно-деформированного состояния кирпичного здания повышенной этажности на свайном фундаменте // Вестник гражданских инженеров. 2018. № 4 (69). С. 72–77.
13. Семенов Д.А. Прочность железобетонных элементов при косом внецентренном сжатии // Вестник гражданских инженеров. 2015. № 5. С. 76–84.

## REFERENCES

1. Ponomarev A.B., Zakharov A.V., Sazonova S.A., Kalyushina S.V., Bezgodov M.A., Shenkman R.I., Zolotozubov D.G. Geotekhnicheskii monitoring zhilogo doma [Geotechnical monitoring of a residential building]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*. 2015. No. 9. Pp. 41–45. (rus)
2. Yushchube S.V., Podshivalov I.I., Tarasov A.A., Lobanov A.A., Lazarev V.M. Otsenka nadezhnosti kirpichnogo zdaniya na svainom fundamente v usloviyakh razvitiya neravnomernykh osadok [Reliability of brick building on pile foundation in relative settlement conditions]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2022. V. 24. No. 1. Pp. 202–215. (rus)
3. Kopanitsa D.G., Useinov E.S., Ustinov A.M. Deformatsii i razrushenie fragmenta kamennoi kladki pri kratkovremennom deistvii szhimayushchei staticheskoi nagruzki [Deformation and fracture of masonry under compressive load]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2015. No. 6. Pp. 90–97. (rus)
4. Derkach V.N., Belov V.V. Prochnost' kamennoi kladki na rastyazhenie pod uglom k gorizontaln'ym rastvornym shvam [Tensile strength of masonry at an angle to horizontal mortar joints]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2012. No. 2. Pp. 65–70. (rus)
5. Sokolov B.S., Antakov A.B. Rezul'taty issledovaniy kamennykh i armokamennykh kladok [Masonry and reinforced masonry]. *Vestnik MGSU*. 2014. No. 3. Pp. 99–106. (rus)
6. Kabantsev O.V. Diskretnaya model' kamennoi kladki v usloviyakh dvukhnosnogo napryazhenogo sostoyaniya [Plastic deformation of masonry under biaxial stress affected by adhesive strength between brick and mortar]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2015. No. 4. Pp. 113–133. (rus)
7. Tonkikh G.P., Osipov P.V., Temiraliuly G., Fedorov S.K. Eksperimental'nye issledovaniya kamennoi kladki, usilennoi kompozitnymi materialami na osnove uglerodnogo volokna [Experimental research of carbon fiber-reinforced masonry]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2017. No. 2. Pp. 98–111. (rus)
8. Novozhilova N.S. Issledovanie napryazhennogo sostoyaniya kirpichnykh sten, usilennykh betonnykh narashchivaniem pri mestnom szhatii [Stress state of masonry walls with concrete reinforcement under local compression]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2021. No. 6 (89). Pp. 34–41. (rus)
9. Shashkin V.A. Effekty vzaimodeistviya osnovanii i sooruzhenii [Interaction between foundations and structures]. *Razvitie gorodov i geotekhnicheskoe stroitel'stvo*. 2012. No. 14. Pp. 141–167. (rus)
10. Shashkin A.G., Shashkin K.G. Vzaimodeistvie zdaniya i osnovaniya: metodika rascheta i prakticheskoe primeneniye pri proektirovani [Interaction of building and foundation: Design methodology and practical application], V.M. Ulitskii, Ed. Saint-Petersburg: Stroizdat, 2002. 48 p. (rus)
11. Kabantsev O.V., Tamrazyan A.G. Uchet izmenenii raschetnoi skhemy pri analize raboty konstruktsii [Changes in the design model during structure operation analysis]. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal*. 2014. No. 5. Pp. 15–26. (rus)
12. Yushchube S.V., Podshivalov I.I., Filippovich A.A., Tryapitsin A.E. Modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya kirpichnogo zdaniya povyshennoi etazhnosti na svainom fundamente [Stress-strain state modeling of high-rise brick building on pile foundation]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2018. No. 4 (69). Pp. 72–77. (rus)

13. *Semenov D.A.* Prochnost' zhelezobetonnykh elementov pri kosom vnetsentrennom szhatii [Strength of reinforced concrete elements under oblique eccentric compression]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2015. No. 5. Pp. 76–84. (rus)

**Сведения об авторах**

*Ющубе Сергей Васильевич*, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, sv@tsuab.ru

*Подшивалов Иван Иванович*, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, ivanpodchivalov@list.ru

*Тарасов Александр Александрович*, канд. техн. наук, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, tar.a.a@mail.ru

**Authors Details**

*Sergei V. Yushchube*, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia; sv@tsuab.ru

*Ivan I. Podshivalov*, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia; ivanpodchivalov@list.ru

*Aleksandr A. Tarasov*, PhD, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia; tar.a.a@mail.ru