

ДЕЙСТВИТЕЛЬНАЯ РАБОТА СТЕН КРУПНОБЛОЧНОГО ЖИЛОГО ЗДАНИЯ ПРИ НАЛИЧИИ ПОДРАБОТОК

В.В. Губанов, А.Н. Миронов, С.С. Наумец, Я.А. Зикий, А.В. Пчеленко
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

Аннотация. Статья посвящена численному исследованию крупноблочного (КБ) жилого здания при наличии подработок. Особое внимание уделено особенностям создания расчетной модели. Выполнен анализ основных параметров, существенно влияющих на напряженно-деформированное состояние (НДС) здания. В процессе исследования определено НДС межблочных швов и блоков. Разработаны критерии и выполнена проверка трещинообразования по растягивающим напряжениям при различных уровнях подработок. Определены количественные и качественные характеристики трещинообразования в стенах здания.

Ключевые слова: крупноблочное здание, НДС, расчетная модель, межблочные швы, муфта сдвига, деформации, раскрытие трещин.

ВВЕДЕНИЕ

Строительство крупноблочных зданий велось еще с 30-х годов XX века (рис. 1). В процессе длительной эксплуатации такие здания подвергаются физическому и моральному износу. Одним из наиболее неблагоприятных воздействий в процессе эксплуатации является неравномерная осадка основания вследствие подработок [1]. В имеющейся многочисленной литературе (см., например, [16]) приводятся общие схемы развития трещин в стенах без указания количественных показателей. Для выбора эффективных методов усиления существующих зданий, а также конструктивных мероприятий по защите здания при проектировании необходимо выявление качественных показателей повреждаемости основных несущих конструкций и определение их количественных характеристик.

Это возможно сделать на основе использования конечно-элементных программных комплексов, позволяющих проводить исследования с применением объемных расчетных моделей [2]. На основании анализа такой модели можно получить достоверные данные о напряжениях и деформациях в конструкциях, но возникает задача перехода от параметров НДС к физическим показателям повреждаемости в виде



*Губанов
Вадим
Викторович*



*Миронов
Андрей
Николаевич*



*Наумец
Сергей
Сергеевич*



*Зикий
Яна
Александровна*



*Пчеленко
Ангелина
Викторовна*



Рис. 1. Типы КБ зданий, различные по высоте, разрезке стен, виду материала изготовления стен

количества, области распространения и ширины раскрытия трещин. Это дает возможность прогнозировать поведение здания в дальнейшем [3], а при введении в схему элементов усиления возможна оценка их эффективности.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Как показывает проведенный анализ литературных источников, вопросам взаимодействия зданий с деформируемым основанием посвящены многочисленные работы [4, 5, 6, 7]. Авторами были рассмотрены проблемы математического моделирования оснований и фундаментов, а также системного анализа механического поведения строительных объектов. В их трудах изложены методы расчета сооружений, учитывающие переменную жесткость основания, деформируемость грунта и конструкционных материалов, фактор времени и произвольные смещения земной поверхности. Отмечена и в отдельных случаях продемонстрирована важность учета при анализе безопасности конструкций и сооружений процессов трещинообразования. Экспериментально определены факторы влияния многократной подработки на характер и степень повреждений зданий. Однако количественные характеристики повреждаемости, необходимые для прогнозирования технического обслуживания и расчета элементов усиления, изучены недостаточно.

Методы моделирования строительных конструкций зданий и сооружений на различных стадиях их работы имеются в [2, 8, 9]. В них рассмотрены теоретические основы метода конечных элементов как основного расчетного инструмента для моделирования системы «здание – фундамент – основание», много внимания уделено вопросам сходимости, оценки приближенного решения, особенностям применения МКЭ для различных типов конструкций. Использование имеющихся численных методов позво-

ляет определять напряжения и деформации, однако имеется проблема интерпретации результатов расчетов в терминах эксплуатационных параметров повреждений.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью данной работы является разработка критериев оценки влияния неравномерных осадок на повреждения несущих стен крупноблочных зданий и определение их количественных характеристик для последующего использования при определении эффективности конструктивных мероприятий для их снижения. Для решения данной цели были поставлены следующие задачи: создание адекватной расчетной схемы, исследование НДС для различных групп подрабатываемых территорий, анализ влияния подработок на количественные и качественные показатели повреждаемости наружных стен зданий.

ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

1. Влияние деформаций основания на несущие конструкции зданий. Техническое состояние здания напрямую взаимосвязано с деформациями оснований, поэтому по характеру расположения повреждений можно судить об особенностях неравномерных осадок фундаментов [9], которые вызывают следующие виды деформаций зданий: прогиб; выгиб; скручивание коробки; перекос; крен здания. Наиболее характерными повреждениями крупноблочных зданий являются: трещины между наружными и внутренними стенами, отслаивание или выкрашивание раствора в стыках блоков, наличие трещин в теле блоков; нарушение защитного цементного слоя стен, нарушение герметичности в местах сопряжения оконных и дверных коробок со стенами, коррозия закладных металлических деталей и связей, разрушение отмостки [10].

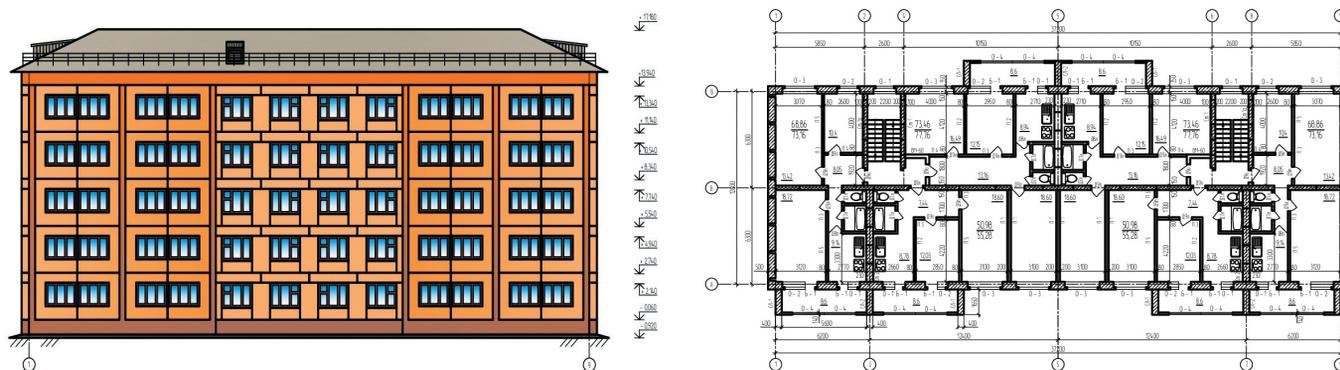


Рис. 2. Фасад и план здания

2. Разработка расчетной модели здания с помощью ПК «ЛИРА САПР».

Объект исследования. Пятиэтажный жилой дом на 30 квартир из крупных блоков (рис. 2) с размерами $37,2 \times 12,6 \times 17,18$ м. Конструктивная схема здания – бескаркасная с продольными несущими стенами. Стены выполнены из крупных блоков: наружные – легкобетонные, внутренние – из тяжелого бетона. Разрезка стен двухрядная.

Методы исследования. Численные исследования были проведены в программном комплексе «ЛИРА-САПР 2013», основой которого является метод конечных элементов (МКЭ), реализованный в форме метода перемещений [8]. С помощью программного комплекса возможно построение объемных моделей, что является определяющим при исследовании пространственных деформаций зданий. Здание моделировалось в объемном напряженном состоянии. Признак схемы 5 – пространственные схемы с 6 степенями свободы в узле.

Разбивка схемы сеткой конечных элементов. Точность расчета зависит от подходящего типа конечного элемента (КЭ) и оптимальной сетки разбивки. Так как решаемая задача имеет большую размерность, была принята сетка $\approx 1 \times 1$ м (рис. 3).

Стены и фундаменты смоделированы объемными телами с типом КЭ – 36, плиты перекрытия,

покрытия и лестничные площадки смоделированы четырех- и трехузловыми пластинами с КЭ – 44 и 42. Перегородки, лестничные марши и кровля не моделировались, нагрузка от них включалась в постоянную. Задание жесткостных характеристик всех КЭ выполнялось в соответствии с проектными решениями.

Моделирование швов крупноблочного здания. В настоящее время нет однозначных рекомендаций о том, стоит ли учитывать стыки при расчете крупноблочного здания. Поэтому при исследовании были разработаны три расчетные модели. Первая (базовая) модель выполнена с монолитной схемой соединения блоков. Во второй модели для создания шарнирного соединения между блоками была выполнена расшивка узлов с последующим объединением соответствующих перемещений этих узлов (для горизонтальных швов – z, ux, uy , для вертикальных – x, z, ux) [3]. Третья модель – со швами, смоделированными пластинами с жесткостными характеристиками раствора шва (горизонтальные швы с модулем деформации $E = 2200$ МПа, коэффициентом Пуассона $\nu = 0,3$, толщиной $H = 1,5$ см, удельной плотностью $\gamma = 0,018$ МН/м³; вертикальные швы с модулем деформации $E = 2200$ МПа, коэффициентом Пуассона $\nu = 0,3$, толщиной $H = 5$ см). Т. к. первая и вторая модели не смогли дать адекватную картину НДС, в качестве расчетной модели была принята третья.

Швы были смоделированы прямоугольными пластинами КЭ – 41 с жесткостными характеристиками, описанными выше.

Совместная работа здания с грунтовым основанием. Особенно эффективно при расчете зданий в сложных грунтовых условиях применение модели переменного коэффициента жесткости – модель

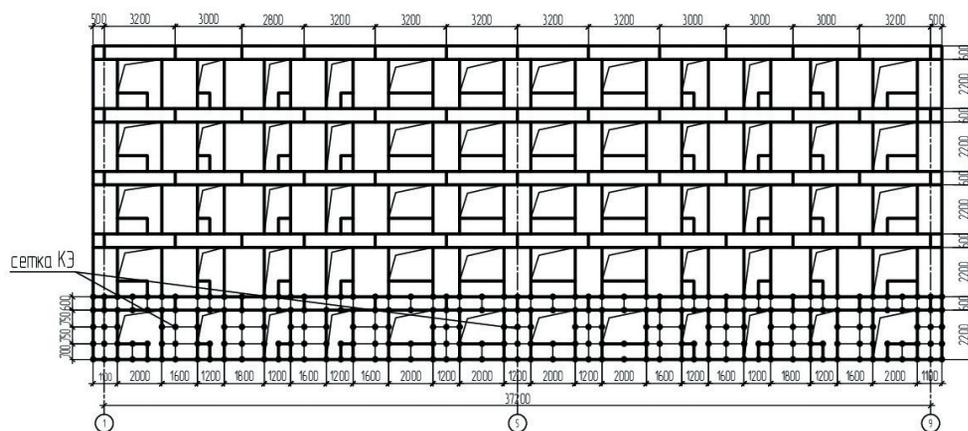


Рис. 3. Разбивка стены по оси А на конечные элементы

Фусса – Винклера [11]. Основным параметром, характеризующим упругие свойства оснований, является коэффициент упругого равномерного сжатия C_z , определяемого по формуле согласно [12]:

$$C_z = \frac{P_{cp}}{S}, \text{ кН/м}^3$$

где P_{cp} – среднее равномерно распределенное давление под подошвой фундамента, кПа;
 S – осадка основания, определяемая методом послойного суммирования линейно-деформируемого полупространства, м.

Согласованная система координат. Расчет производился с учетом согласования осей. Местные оси каждого элемента были сонаправлены в соответствии с глобальной системой координат для упорядочивания напряжений в КЭ.

Граничные условия закрепления моделей. Закрепление здания, моделирующее опирание на основание, обеспечивалось в плане связями (по x , y) по углам здания в узлах. Так как опирание плит на стены шарнирное, была выполнена расшивка узлов опирания с последующим объединением соответствующих перемещений этих узлов (x , y , z , u_y , u_z). Общий вид объемной модели здания показан на рис. 4. Полученная модель содержит 35 666 элементов и 34 814 узлов.

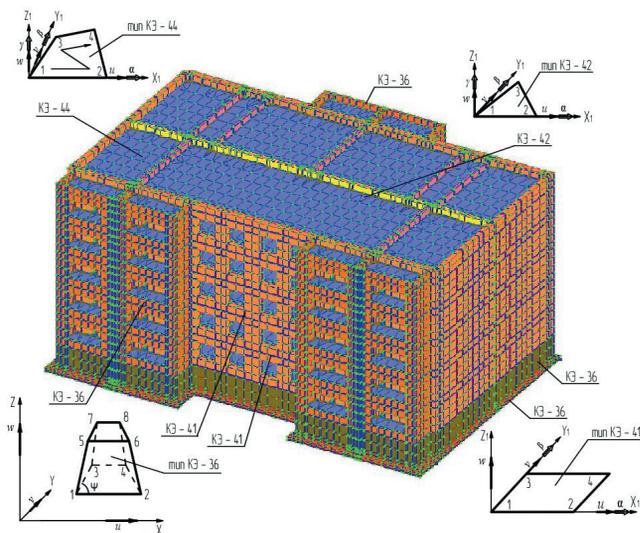


Рис. 4. Расчетная модель. Общий вид и описание КЭ

Задание нагрузок. Сбор постоянных и временных нагрузок выполнялся согласно [15]. Статические воздействия задавались как в виде сосредоточенных сил (от лестничных маршей на площадки), так и в виде равномерно распределенных нагрузок (на элементы перекрытия и покрытия). Учитывались следующие нагрузки: постоянная нагрузка на перекрытие,

покрытие, на стены от кровли, нагрузка от бокового давления грунта, временная полезная, ветровая и снеговая.

В качестве аварийных нагрузок принята мульда сдвига земной поверхности. Схема вертикальных перемещений земной поверхности при обработке в виде параболического цилиндра. Аварийная нагрузка задавалась в виде заданных перемещений непосредственно на узлы КЭ подошвы фундамента согласно [13] по формуле:

$$y_i = \frac{n_p \times m_p \times x^2}{2 \times R}, \text{ м}$$

где n_p – коэффициент для расчета смещений и деформаций (при кривизне p);
 m_p – коэффициент условий работы, при расчете зданий на действие деформаций земной поверхности;
 x – расстояние от точки, которая рассматривается, до центральной оси здания, м;
 R – радиус кривизны, м.

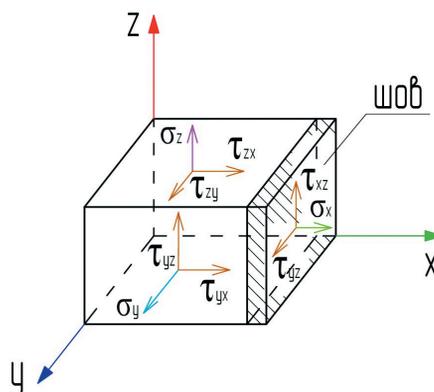


Рис. 5. Направление напряжений в блоке и шве

3. Исследование НДС для различных групп подрабатываемых территорий. В результате расчета был выполнен анализ полученных данных по изополям перемещений и напряжений (рис. 5), по эпюрам усилий и прогибов, по главным и эквивалентным напряжениям. По итогам расчета выполнена проверка межблочных швов (рис. 7) и блоков (рис. 10) на раскрытие трещин [1].

Условие появления трещин в швах согласно [14]:

$$\sigma_x \geq R_t$$

где σ_x – нормальные напряжения в швах, МПа;
 R_t – расчетное сопротивление раствора шва растяжению, МПа.

Для трещин принималось, что ширина раскрытия трещин в швах равна упругой деформации блока при напряжениях, превышающих расчетное сопротивление.

$$\delta = \Delta l = \frac{\sigma_x \times l_0}{E}, \text{ м},$$

где δ – ширина раскрытия трещин, м;
 σ_x – напряжение материала, МПа;
 l_0 – длина блока до деформации, м;
 E – модуль упругости материала, МПа.

В результате исследования был выполнен расчет нормальных и главных напряжений (рис. 6, 7) и рассчитана ширина раскрытия трещин в швах для выпуклой и вогнутой мульды для радиуса кривизны 1, 3 (рис. 8) и 7 км, соответствующих I и II группе подрабатываемых территорий, согласно [13].

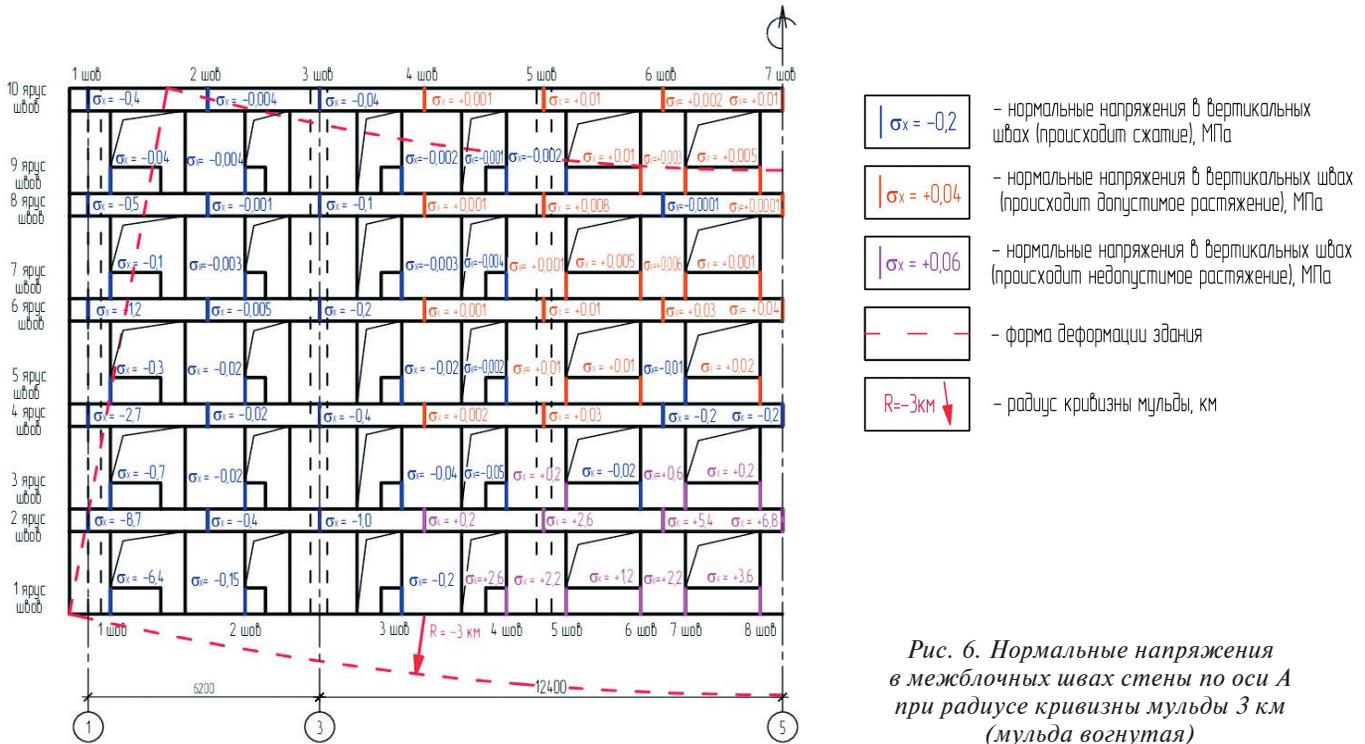


Рис. 6. Нормальные напряжения в межблочных швах стены по оси А при радиусе кривизны мульды 3 км (мульда вогнутая)

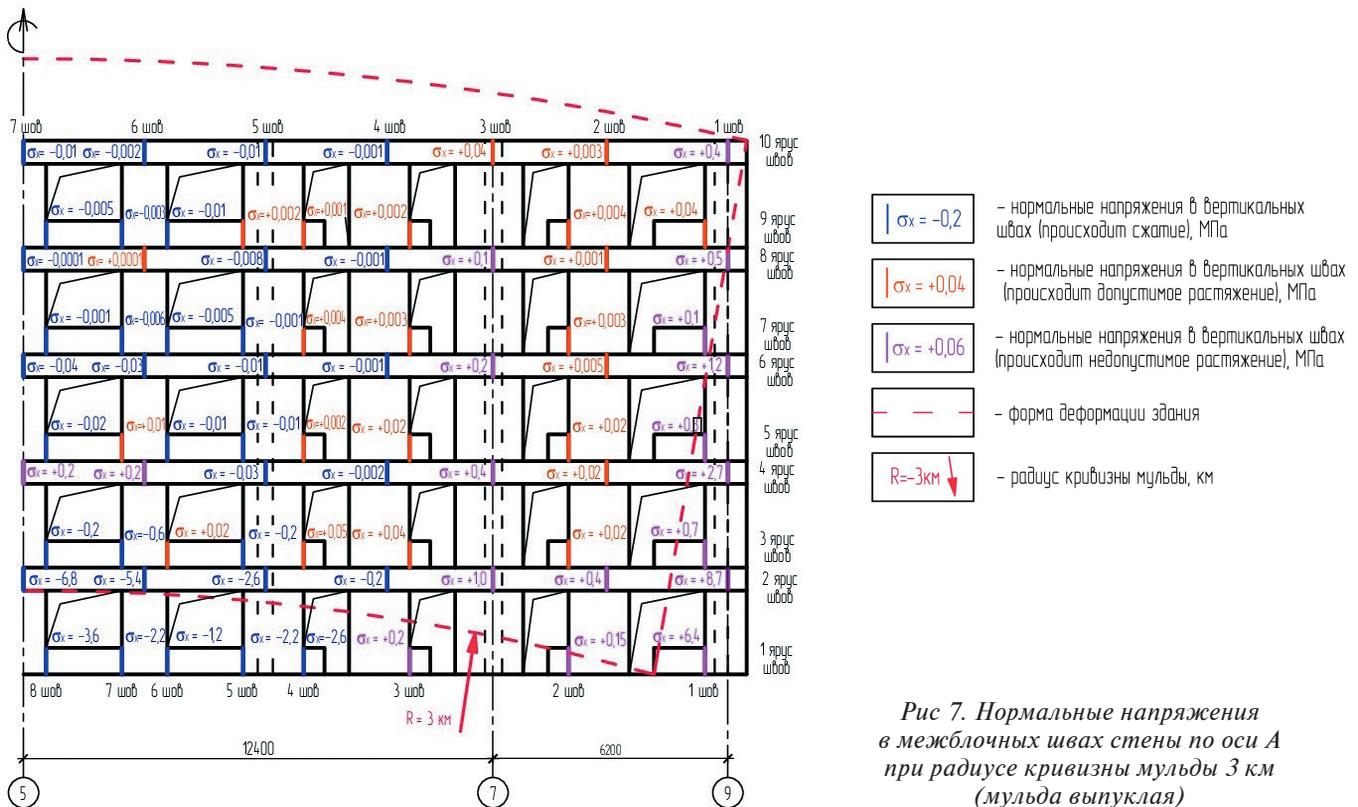


Рис. 7. Нормальные напряжения в межблочных швах стены по оси А при радиусе кривизны мульды 3 км (мульда выпуклая)

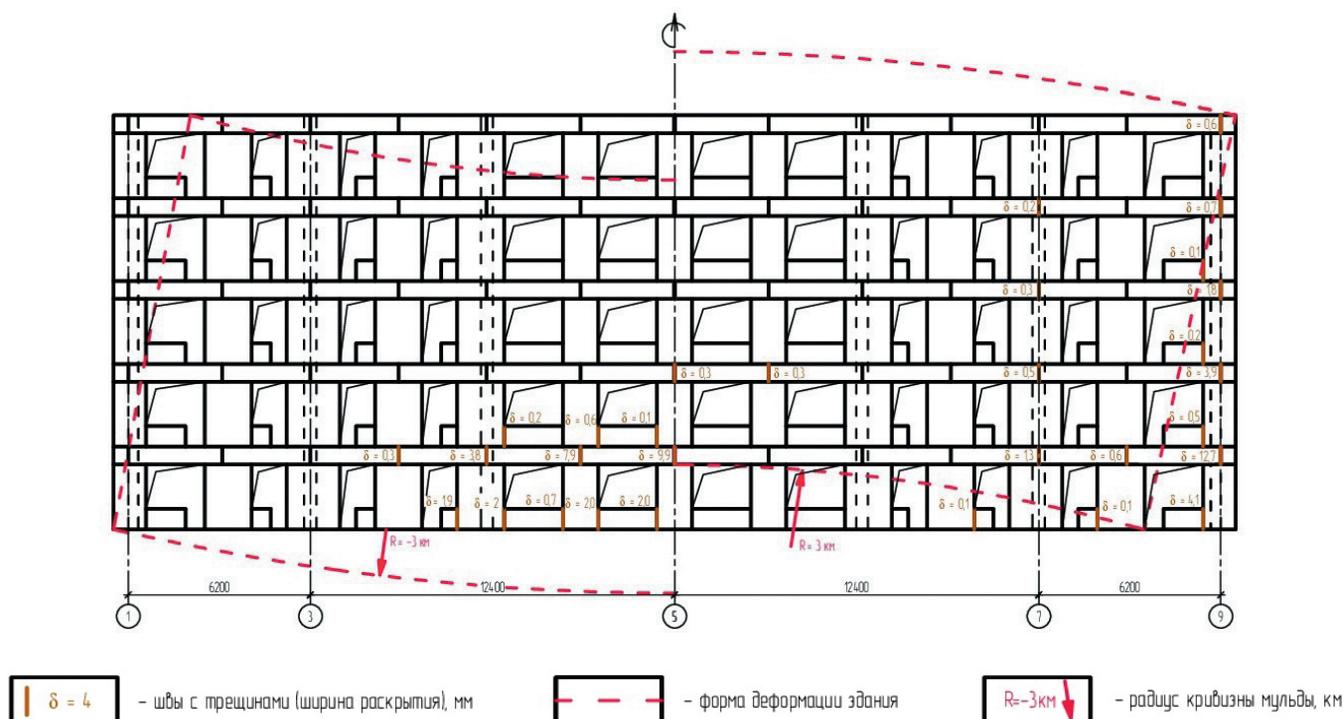


Рис. 8. Ширина раскрытия трещин в межблочных швах стены по оси А при радиусе кривизны мурды 3 км (мурда вогнутая – слева от центральной оси здания, мурда выпуклая – справа)

Так как швы с трещинами выключаются из работы стен, была выполнена корректировка модели и определено возникновение трещин в самих блоках. Для этого в расчетной схеме жесткостные характеристики данных швов были изменены (модуль упруго-

сти принят 1 МПа) и выполнен расчет главных напряжений в блоках (рис. 9). Так как по направлению шва напряжения σ_x близки к 0, то в расчет главных напряжений включены только составляющие σ_z , σ_y и σ_{zy} (рис. 10).

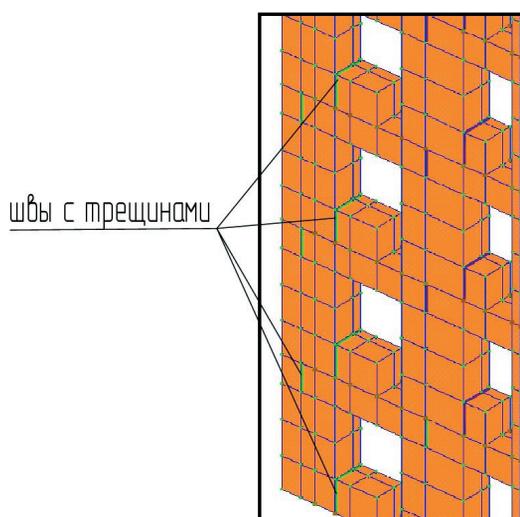


Рис. 9. Моделирование швов с трещинами

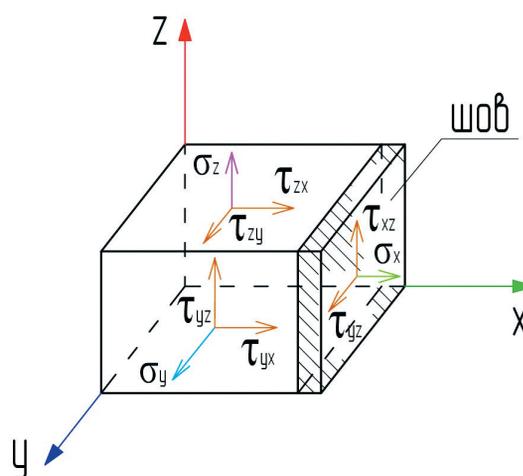


Рис. 10. Направление напряжений после образования трещин в швах

Главные напряжения в блоках определялись по формуле:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_z + \sigma_y}{2} \pm \frac{1}{2} \times \sqrt{(\sigma_z - \sigma_y)^2 + 4\tau_{zy}^2}$$

где σ_z , σ_y – нормальные напряжения в блоках по осям z, y, МПа;

τ_{zy} – касательные напряжения в блоках, МПа.

Результаты расчета главных растягивающих напряжений в блоках представлены на рис. 11, схема блоков с трещинами – на рис. 12

4. Анализ влияния подработок на количественные и качественные показатели наружных стен зданий. В результате анализа расчета были выявлены зоны напряжений, превышающих предельно

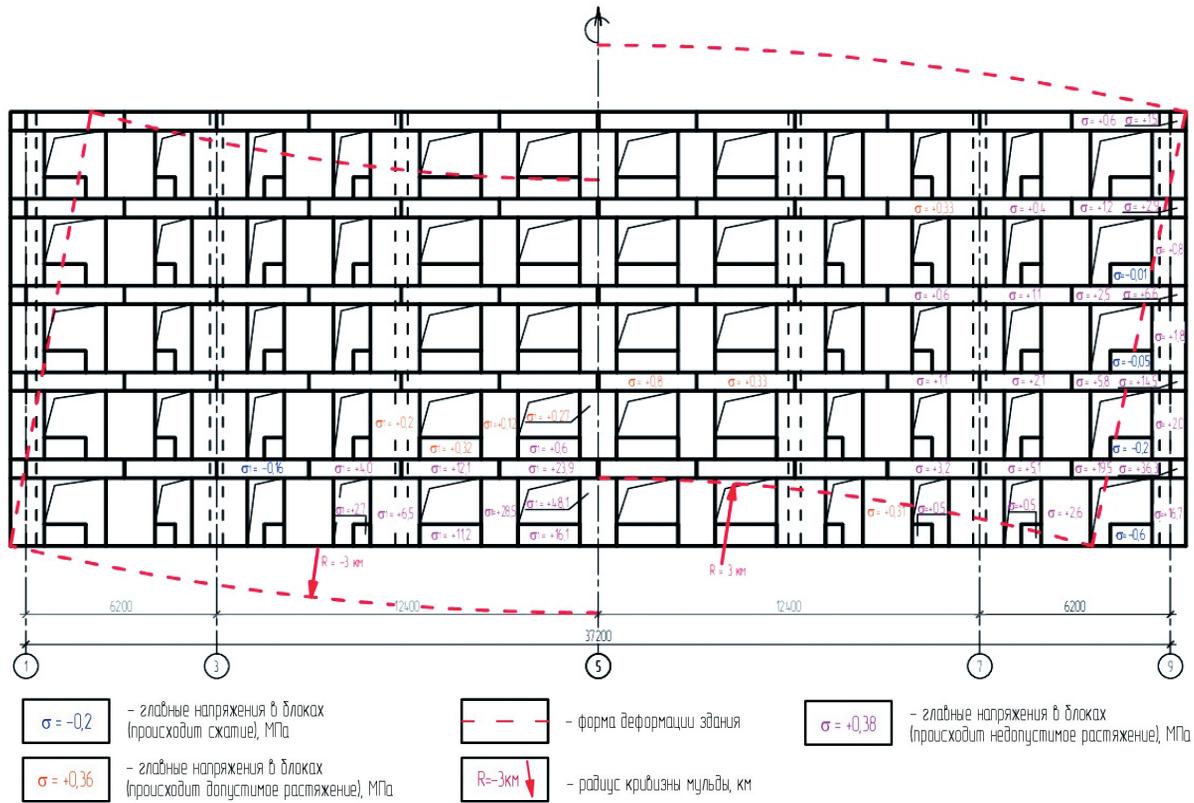


Рис. 11. Главные напряжения в блоках стены по оси А при радиусе кривизны мурды 3 км (мурда вогнутая – слева от центральной оси здания, мурда выпуклая – справа)



Рис. 12. Блоки стены по оси А с трещинами при радиусе кривизны мурды 3 км (мурда вогнутая – слева от центральной оси здания, мурда выпуклая – справа)

допустимые значения для материала конструкций, которые совпали с местами образования трещин и зонами наибольших дефектов реальных КБ зданий. С изменением группы подработок увеличивается ширина раскрытия трещин в швах, начинают образовываться сквозные трещины в простеночных и перемычных блоках, происходят смещения блоков.

В результате исследования был выполнен сравнительный анализ влияния подработок на количественные и качественные характеристики повреждаемости наружных стен КБ здания в зависимости от уровня подработки территории (рис. 11 –

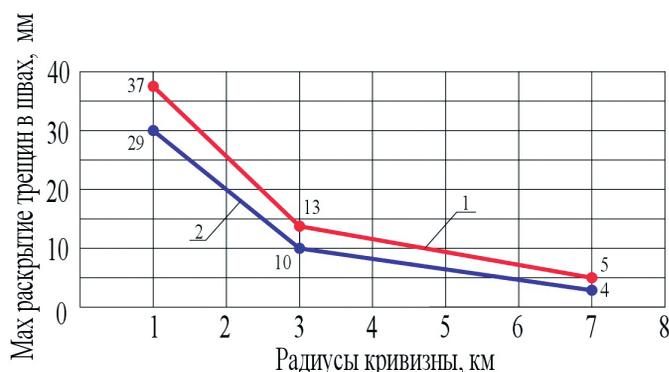


Рис. 13. Максимальное раскрытие трещин в швах

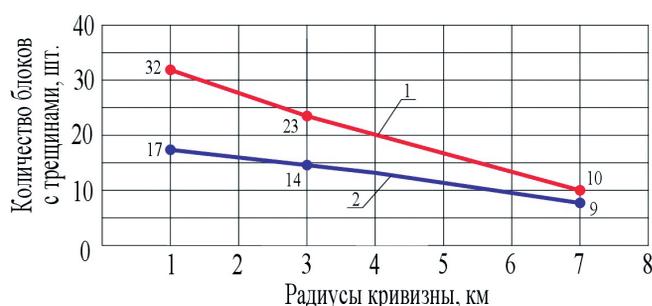


Рис. 15. Количество блоков с трещинами

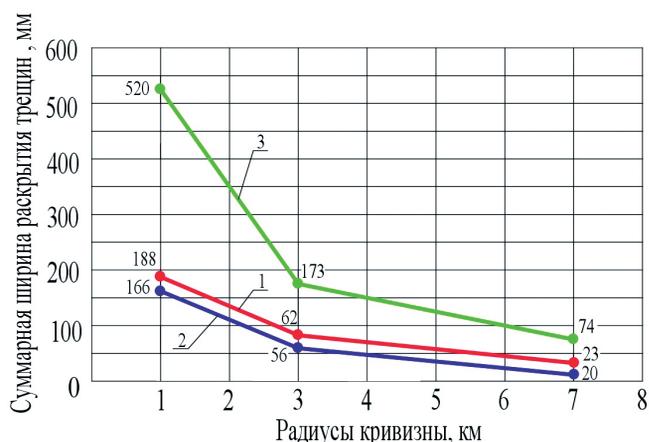


Рис. 16. Зависимость суммарной максимальной ширины раскрытия трещин в одном уровне

рис. 16). На рисунках цифрами обозначено: 1 – при выпуклой мульде сдвижения, 2 – при вогнутой мульде сдвижения, 3 – при отсутствии упругих деформаций материала. Данные приведены для стены по оси А, количество блоков в стене – 115 шт., количество вертикальных швов – 150. Для использования полученных результатов при других типах неравномерных осадок основания следует перейти к относительной осадке (отношение разности перемещений к половине длины здания).

Относительная осадка составляет 0,015 для радиуса 1,0 км; 0,005 для радиуса 3,0 км; 0,002 для радиуса 7,0 км.



Рис. 14. Количество швов с трещинами

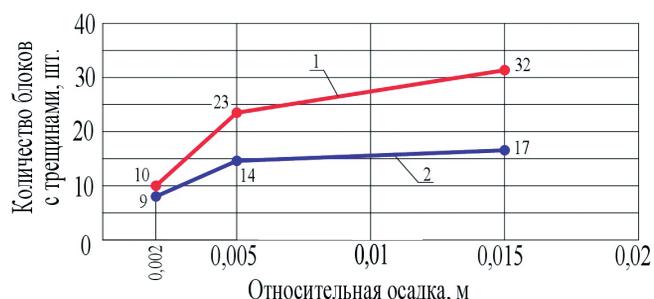


Рис. 17. Процент поражения стены трещинами в зависимости от радиуса мульды



ВЫВОДЫ

1. При создании расчетной модели следует особое внимание уделять вопросам, которые могут существенно повлиять на картину НДС КБ здания, таким как:

- разбивка сетки КЭ;
- моделирование межблочных швов КБ здания;
- совместная работа здания с грунтовым основанием;
- граничные условия закрепления моделей.

2. Как показал численный анализ КБ здания, под действием постоянных и временных нагрузок происходят равномерные осадки основания до 2 см, которые не опасны (трещины в стенах не образуются). При задании в схему аварийных нагрузок от подработок возникают большие и неравномерные осадки основания (максимальные осадки при радиусе кривизны мульды 7 км – 4 см, при радиусе 3 км – 9 см, при радиусе 1 км – 27 см), которые приводят к образованию трещин в межблочных швах и блоках КБ здания.

3. В результате расчета трещинообразования (определения наличия трещин и их ширины раскрытия) выявлено следующее:

- максимальная ширина раскрытия трещин: при радиусе кривизны 1 км составляет 37 мм, при радиусе 3 км – 13 мм, при радиусе 7 км – 5 мм.
- деформации при действии выпуклой мульды выше по сравнению с вогнутой: больше количество межблочных швов с трещинами (6 шт. при радиусе кривизны 1 км), количество блоков с трещинами (15 шт.), суммарная ширина раскрытия трещин по стене (разность 22 мм).

4. Предложенный способ моделирования повреждений крупноблочных зданий может быть использован для исследования НДС при определении эффективности конструктивных мероприятий по снижению трещинообразования в стенах.

Библиографический список

1. *Крупноблочное строительство в Ленинграде* / ред. Б.Д. Васильев, К.Д. Халтурин, И.М. Чайко, С.Л. Голубев,

- И.Г. Доброхотов, К.К. Крупица, Л.А. Погоржельский, А.А. Постников, Ю.В. Ширый. – Ленинград, 1957. – 95 с.
2. Городецкий А.С. *Компьютерные модели конструкций* / А.С. Городецкий, И.Д. Евзеров. – М.: АСВ, 2009. – 360 с.
 3. Жук Ю.Н. *Особенности проектирования крупнопанельных зданий с применением программных платформ для информационного моделирования (BIM) и программных комплексов расчета конструкций* / Ю.Н. Жук, В.В. Курнавин, Ю.В. Панасенко // *Жилищное строительство*. – 2017. – № 5. – С. 20–25.
 4. Шашкин В.А. *Эффекты взаимодействия оснований и сооружений* // *Развитие городов и геотехническое строительство*. – 2012. – № 14. – С. 141–167.
 5. Кашеварова Г.Г. *Численное моделирование деформирования и разрушения системы здание-фундамент-основание* / Г.Г. Кашеварова, Н.А. Труфанов. – Екатеринбург-Пермь: УрО РАН, 2005. – С. 225.
 6. Клепиков С.Н. *Расчет сооружений на деформируемом основании*. – К.: НИИСК, 1996. – 203 с.
 7. Канальдин Т.Е. *Взаимодействие здания с деформируемым основанием при многократной подработке: автореферат дис. ... кандидата технических наук (05.23.02)*. – Санкт-Петербург, 1992. – 27 с.
 8. Перельмутер А.В. *Расчетные модели сооружений и возможность их анализа* / А.В. Перельмутер, В.И. Сливкер. – К: Сталь, 2002. – 600 с.
 9. Шутенко Л.Н. *Механика грунтов, основания и фундаменты: учебник* / Л.Н. Шутенко, А.Г. Рудь, О.В. Кицаева. – Харьков: ХНУГХ им. А. Н. Бекетова, 2015. – 501 с.
 10. *Инструкция по технической эксплуатации крупноблочных жилых домов* / изд. МЖКХ. – РСФСР, 1968. – 88 с.
 11. *Методические рекомендации по определению коэффициентов жесткости оснований зданий и сооружений* / НИИСК Госстрой СССР. – К.: НИИСК, 1977. – 33 с.
 12. ДБН В.2.1-10-2009 *Основания и фундаменты зданий и сооружений* / Издание официальное. – К.: Минстрой Украины, 2000. – С. 90.
 13. ДБН В.1.1-5-2000 *Здания и сооружения на подработываемых территориях и просадочных грунтах* / Издание официальное. – К.: Минстрой Украины, 2000. – 72 с.
 14. ДБН В.2.6-98~2009 *Бетонные и железобетонные конструкции* / Основные положения. Издание официальное. – К.: Минстрой Украины, 2009. – 75 с.
 15. ДБН В.1.2-2:2006 *Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования*. – К.: Минстрой Украины, 2006. – 58 с.
 16. Кучеренко В.А. *Рекомендации по обследованию и оценке технического состояния крупнопанельных и каменных зданий*. М.: ЦНИИСК им. Кучеренко, 1988. – 140 с.