

Comparative analysis of the spatial rigidity of a multi-storey reinforced concrete frame building with foam aerated concrete walls and new frame-sheathing envelope structures

A.A. Khodjaev¹a, I.S. Karimjonov²b

¹The Ministry of Higher education, science and innovations, Uzbekistan

²Tashkent state transport university, Tashkent, Uzbekistan

Abstract:

A comparative analysis of the spatial rigidity of a multi-storey reinforced concrete frame building with foam aerated concrete walls and new frame-sheathing envelope structures (FSW) is presented based on dynamic calculation using the LIRA SOFT software package using the finite element method in the temperature, climatic and seismic conditions of Uzbekistan.

Keywords:

Aerated concrete, wall, frame-sheathing wall (FSW), light steel thin-walled structures (LSTS), thermal profile, seismic resistance, energy saving, ecology, thermal insulation.

Сравнительный анализ пространственной жесткости многоэтажного железобетонного каркасного здания с газобетонными стенами и новыми каркасно-обшивными ограждающими конструкциями

Ходжаев А.А.¹a, Каримжонов И.С.¹b

¹Министерство Высшего образования, науки и инноваций, Узбекистан

²Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Узбекистан

Аннотация:

Приведен сравнительный анализ пространственной жесткости многоэтажного железобетонного каркасного здания с газобетонными стенами и новыми каркасно-обшивными ограждающими конструкциями (КОС) на основе динамического расчета с помощью программного комплекса ЛИРА СОФТ методом конечных элементов в температурно-климатических и сейсмических условиях Узбекистана.

Ключевые слова:

газобетон, стена, каркасно-обшивная стена (КОС), лёгкие стальные тонкостенные конструкции (ЛСТК), термопрофиль, сейсмостойкость, энергосбережение, экология, теплоизоляция.

1. Введение

Обеспечение надежности и долговечности зданий и сооружений в условиях повышенной сейсмичности и деструктивных воздействий температурно-влажностных условий резко-континентального сухого жаркого климата во многом обусловлено конструктивными решениями объектов, строящихся на таких территориях.

В настоящее время расчет зданий и сооружений на действие сейсмических нагрузок производится в соответствии с КМК 2.01.03-19 «Строительство в сейсмических районах», в основу которых заложено упругое деформирование конструкций с учетом податливости систем и образование пластических шарниров. Расчет прочности элементов производится по предельным усилиям, воспринимаемым элементом в нормальных, наклонных и пространственных сечениях. При этом вводятся специальные коэффициенты условий

работы, учитывающие особенности сейсмического воздействия. Расчет конструкций зданий и сооружений по указанному методу наглядно демонстрирует значение массы системы в общем контексте ее устойчивости при динамических воздействиях. Поэтому снижение массы здания является весьма актуальным для обеспечения его сейсмостойкости и наиболее правильного поведения здания при землетрясениях, обеспечивающего его лучшую надежность и в то же время экономичность проектных решений.

В условиях Узбекистана условие сейсмостойкости зданий обеспечивается на основе теории сейсмостойкого строительства и зависит от типа здания, территории застройки, внешней среды и других факторов. По мере увеличения высоты здания увеличивается и период его свободных (частных) колебаний. Обычно изменение периода свободных колебаний здания приводит к изменению реакции здания и соответствующих напряжений в верхних и нижних уровнях. Известно, что период доминирующей

^a <https://orcid.org/0009-0000-5159-2972>

^b <https://orcid.org/0009-0001-7326-6382>



вибрации землетрясения зависит от геологических условий местности вокруг очага и длится 0,1–2 секунды. Увеличение высоты здания (и, соответственно, периода колебаний) отдаляет его от доминирующего периода колебаний землетрясения, что обусловило принятие наиболее оптимальным для сейсмических районов зданий с высотой не более 15 этажей.

2. Основная часть

В настоящее время среди строящихся объектов городских территорий подавляющее большинство составляют многоэтажные железобетонные каркасные здания. Популярность такого типа зданий обусловлена прочностью и сейсмостойкостью их пространственной системы, возможностью практически безграничного проектирования и воплощения архитектурных решений, наличием сравнимых преимуществ по цене, отлаженностью технологий строительства и доступностью стройматериалов.

Как известно, несущая способность каркасных зданий обеспечивается пространственной работой железобетонного или металлического каркаса. При этом, в зависимости от заданных параметров и конструктивных решений здания, его пространственная жесткость обеспечивается соответствующими дополнительными связями, диафрагмами и сердечниками. В отдельных случаях диафрагмы жесткости служат также и ограждающие конструкции каркасных зданий, но все же их основная задача заключается в обеспечении функциональности архитектурной среды здания, создание условий для жизнедеятельности его инфраструктуры.

Сравнительный анализ многоэтажных железобетонных каркасных зданий со стенами различных конструкций с учетом их параметров дает возможность выявить наиболее оптимальные и приемлемые из них. С этой целью такой анализ проведен между традиционными, наиболее распространенными конструктивными решениями стен (кирпичные стены, стены из лёгких пористых ячеистых бетонов), а также новым предлагаемым конструктивным решением – каркасно-обшивные стенные конструкции (КОС).

Лёгкие пористые ячеистые бетонные блоки. Ячеистые бетоны являются разновидностью легкого бетона. В процессе их производства образуется характерная "ячеистая" структура. Пористость ячеистого бетона можно регулировать, получая бетоны разной плотности и назначения. По назначению ячеистые бетоны делятся на три группы: конструкционные, конструкционно-теплоизоляционные, теплоизоляционные. Среди блоков из ячеистых бетонов наибольшее распространение получили пенобетонные и газобетонные блоки.

Блоки из пенобетона. Пенобетон изготавливается из цемента, песка, воды и пенообразователя. Изделия из пенобетона отличают хорошие звуко- и теплоизоляционные свойства, малый вес. Материал является негорючим и не разрушается от воздействия высокой температуры. На свойства пенобетона оказывает большое влияние качество пенообразователя. В настоящее время в основном применяются

синтетические пенообразователи на основе органических соединений как отечественного, так и импортного производства. Изменяя соотношение составляющих пенобетонной смеси, можно получать пенобетон различной плотности (400–1800 кг/м³). С увеличением плотности растет прочность пенобетона, но падает сопротивление теплопередачи. Пенобетонные блоки применяют в качестве ограждающих конструкций в каркасных зданиях, а также как термовкладыши ограждающих конструкций многоэтажных жилых домов. В малоэтажном домостроении в качестве несущих конструкций используют блоки из пенобетона марок от Д500 и выше. В качестве теплоизоляции, как правило, применяют блоки марки Д400 [1].

Блоки из газобетона. Газобетон получают из вяжущего (цемента, извести), кварцевого песка, воды, с добавлением газообразующих веществ (благодаря чему мелкие воздушные поры распределяются равномерно). Именно поэтому строительные элементы из газобетона имеют малый вес и хорошие теплоизоляционные свойства. Газобетон относится к конструкционно-теплоизоляционным строительным материалам. Его применение для возведения ограждающих конструкций позволяет значительно уменьшить массу и толщину стен, что не только сокращает сроки и объем строительных работ, но и снижает стоимость строительства в связи с понижением массы здания и экономией на возведении фундамента. Конструкции из газобетона имеют более высокие теплофизические показатели в сравнении с блоками из тяжелых бетонов, керамическими и силикатными штучными материалами. Например, для устройства наружной стены достаточными являются блоки из пористого бетона толщиной 375 мм (плотностью 400 кг/м³).

Газобетон является негорючим материалом и может быть использован для всех классов противопожарной безопасности. Он не разрушается от воздействия высокой температуры и препятствует распространению огня. Благодаря своей структуре газобетон является морозостойким строительным материалом. Кроме того, газобетонные блоки легко обрабатываются (пилятся, сверлятся, фрезеруются, штрабятся, гвоздятся), а также не подвергаются коррозии и не гниют. При одинаковой плотности прочность газобетона больше почти в 2 раза, чем прочность без автоклавного пенобетона [1].

Особенностью газобетона как высокопористого материала являются высокая паропроницаемость и значительное водопоглощение. Поэтому в ограждающих конструкциях, выполненных из газобетонных блоков, необходимо обеспечить свободный транзит пара изнутри помещения наружу. Этого можно добиться устройством либо вентилируемого фасада, либо системы наружного утепления с применением финишного слоя с высокой паропроницаемостью. В случае невозможности устройства наружного утепления или высокой влажности внутри помещения, необходимо надежно защитить ограждающую конструкцию от проникновения пара изнутри (например, устройства с внутренней стороны пароизоляционной пленки) [1].

Преимуществами ячеистого бетона являются его низкая масса, сравнимая дешевизна (на 15–20 % дешевле обычного легкого бетона), доступность исходного сырья (песок и цемент), несложность механической обработки. К числу недостатков



относятся: значительное трещинообразование, пониженная морозостойкость, плохая связь с фактурными слоями, развитие коррозионных процессов в арматуре [2].

Каркасно-обшивная стена (КОС) — это многослойная комбинированная конструктивная система, состоящая из каркаса, материалов для утепления/звукозоляции, заполняющих полость каркаса, обшивок стены (наружной и внутренней), крепежных элементов, пароизоляции и ветрозащиты, наружной облицовки (фасада), а также совокупности технических и технологических решений, определяющих правила и порядок установки этой системы в проектное положение.

Наружные ненесущие КОС с каркасом из ЛСТК — это ограждающие конструкции, воспринимающие нагрузку от собственного веса, ветровую и технологическую нагрузки и передающие их на несущие конструкции здания [3-5].

КОС – это перспективная, новая энергосберегающая технология, которая по праву может использоваться в жилом высотном домостроении. КОС позволит обеспечить энергосбережение за счет применения эффективного утеплителя и термопрофиля с прорезями, увеличивающими путь теплового потока и как следствие – сопротивление теплопередаче, а также снизит материальные, трудовые и стоимостные затраты в массовом строительстве при высоких качественных и эксплуатационных показателях и сократит сроки строительства за счет технологии сборки.

Расчет многоэтажного железобетонного каркасного здания с различными ограждающими конструкциями. В качестве объекта расчета выбрано пятиэтажное железобетонное каркасное здание с двумя вариантами ограждающих конструкций: первый вариант – газобетонные стены, второй вариант – каркасно-обшивные стены (КОС). Для технического сопоставительного анализа произведен также расчет каркаса без стен («этажерка»).

Характеристика строительной площадки:

- Район строительства – Республика Узбекистан, Ташкентская область;
 - климатический район строительства - 4 по КМК 2.01.01-94;
 - Нормативное значение снежного покрова на 1 м² горизонтальной поверхности земли – 50 кг/м² для площади первого снега;
 - Нормативное значение давления ветра – 38 кг/м² в 3-м ветровом районе;
 - строительная площадка расположена вне зоны затопления города;
 - сейсмостойкость строительной площадки, КМК 2.01.01-19;
 - Сейсмичность участка по карте строительно-монтажных работ города Ташкента – 8 баллов;
 - категория грунтов по сейсмическим характеристикам - 2.

Несущие конструкции и конструктивные элементы здания:

- конструктивное решение – каркас;
 - основания для несущих конструкций здания – монолитная фундаментная плита. Бетон класса Б 25 на традиционном цементе для несущих колонн. Бетонная подготовка под фундаментные плиты производится из бетона класса Б 20 толщиной 0,5 м;
 - сечение двух несущих колонн лестничной клетки -

400x400 мм из бетона класса Б 25, сечение всех остальных колонн между этажами - 400x600 мм из бетона класса Б 25, сечения ригелей несущих межэтажные плиты перекрытия и лестничные клетки, 400x400 мм из бетона класса Б 20, стена технического этажа – подвала из бетона класса Б 20 толщиной 400 мм, межэтажные плиты перекрытия, перекрытия лестниц и лестничных клеток имеют размеры толщиной 180 мм из бетона класса Б 20;

- арматура класса А3 используется во всех несущих элементах здания;
 - здание прямоугольной формы, размеры в осях – 24,7×16,6 м;
 - этажность здания – 5 этажей;
 - 1-5 - высота этажа (от пола до пола) - 3,6 м;
 - высота цокольного (подвального) этажа (от пола до пола 1 этажа) - 3,0 м.

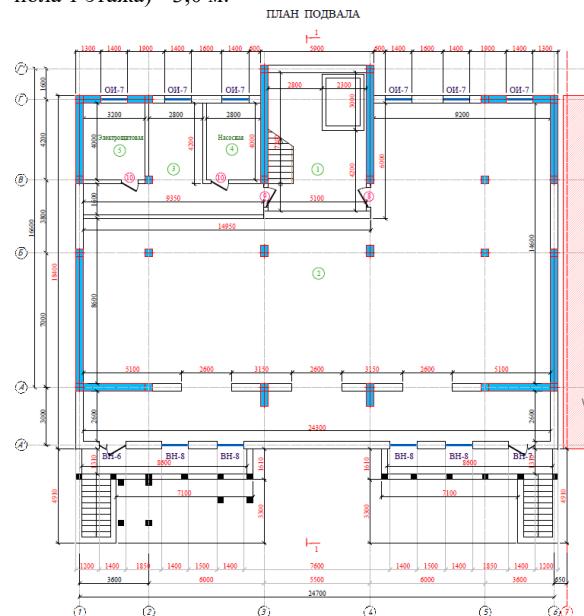


Рисунок 1. План технического этажа здания

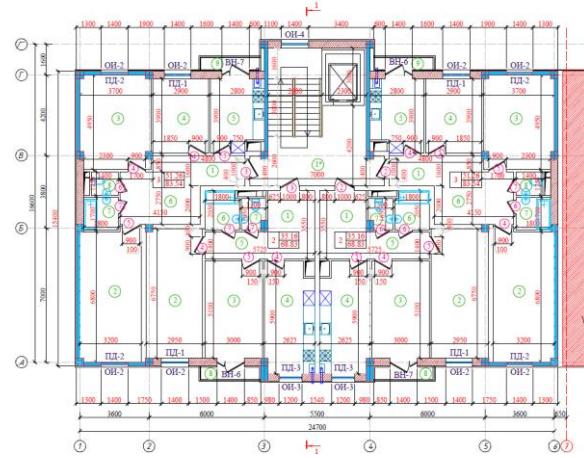


Рисунок 2. Типовой план этажа здания

Модели объектов для проектирования. При проведении численного анализа были сделаны расчётные работы со следующими наружными и внутренними стенами рассматриваемого здания:



Таблица 1

Наружные стены и их особенности

№	Типы и толщина наружных стен здания, мм	Характеристики наружных стен	Масса 1 м ² наружной стены, кг, около
1	Газобетонная: - 300	Марка газобетона: - Д 800. $\rho = 800 \text{ кг/м}^3$.	240 (250)
2	Каркасно-обшивная стена: - 240		80
3	Этажерка (без наружных стен)		

3d rendering file

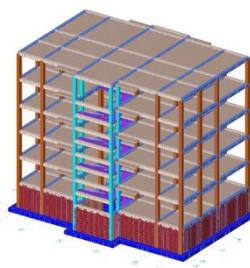


Рисунок 4. Вид расчётной модели (схемы) здания сзади

Как правило здания в сейсмических районах проектируются по схемам, при которых стены этих зданий воспринимают сейсмическую нагрузку как несущие конструкции, либо не являются несущими, а сейсмическую нагрузку воспринимает каркас здания. Однако не рекомендуется увеличивать высоту зданий, наружные стены которых воспринимают сейсмические нагрузки, более чем на 5-7 этажей. Поэтому, согласно пунктам Е и Ж, таблицы 3.1 КМК 2.01.03-19 расчёт наружных и внутренних стен в модели рассматриваемого многоэтажного здания выполняется как ненесущие и без жёсткого их закрепления в здании.

Методы расчета. Расчеты проводились с использованием нормативного документа КМК 2.01.03-19 «Строительство в сейсмических районах» и динамическим способом в программе ЛИРА СОФТ методом конечных элементов в перемещениях.

Деформированная схема элементов железобетонного каркаса здания приведена на рис. 5-10.

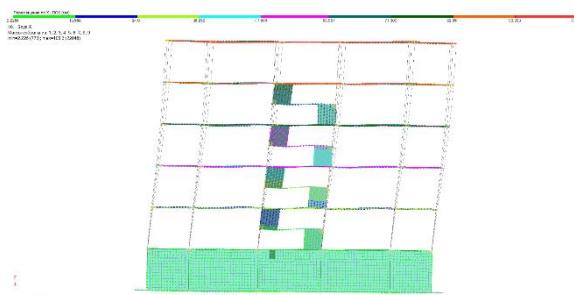


Рисунок 5. Мозаика перемещений по оси X пятиэтажного каркасного здания с наружными и внутренними стенами из газобетона; максимальное перемещение 105,33 мм.

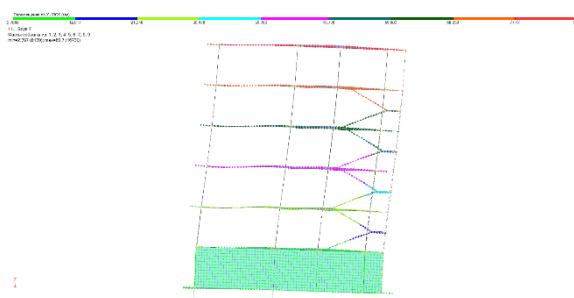


Рисунок 6. Мозаика перемещений по оси Y пятиэтажного каркасного здания с наружными и внутренними стенами из газобетона; максимальное перемещение 86,70 мм.

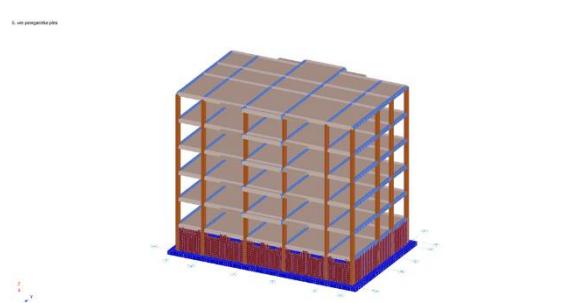


Рисунок 3. Вид расчётной модели (схемы) здания спереди



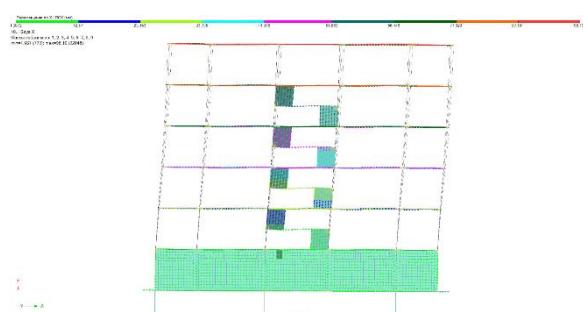


Рисунок 7. Мозаика перемещений по оси X пяти этажного каркасного здания без наружных и внутренних стен; максимальное перемещение 98,19 мм.

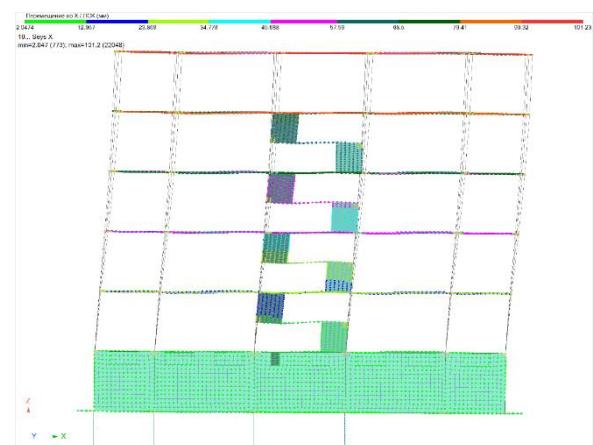


Рисунок 9. Мозаика перемещений по оси X пяти этажного каркасного здания с наружными и внутренними каркасно-обшивными стенами; максимальное перемещение 101,23 мм.

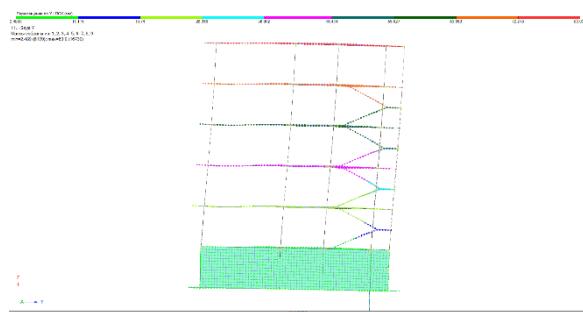


Рисунок 8. Мозаика перемещений по оси Y пяти этажного каркасного здания без наружных и внутренних стен; максимальное перемещение 80,9 мм.

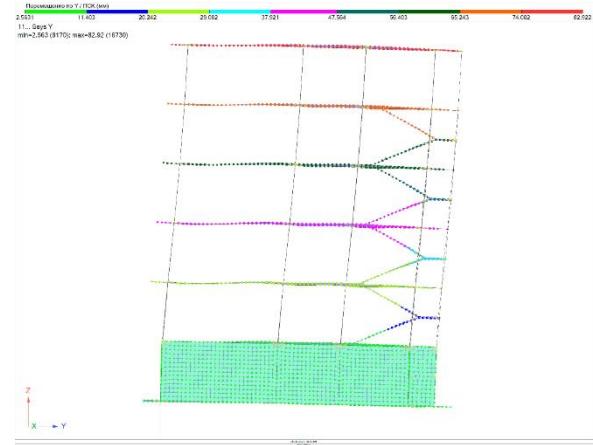


Рисунок 10. Мозаика перемещений по оси Y пяти этажного каркасного здания с наружными и внутренними каркасно-обшивными стенами; максимальное перемещение 82,92 мм.

Приведенные выше результаты сведены в таблицу 3:

Таблица 3

Результаты перемещения конструкций пяти этажного железобетонного каркасного здания по осям X и Y

№	Конструктивная система и размеры здания с железобетонным каркасом	Максимальное перемещение в направлении оси X, мм	Максимальное перемещение в направлении оси Y, мм
1	5-этажное каркасное здание с наружными и внутренними стенами из газобетона, размеры 24,7×16,6 м.	105,33	86,70
2	5-этажное каркасное здание без наружных и внутренних стен, размеры 24,7×16,6 м.	98,19	80,9
3	5-этажное каркасное здание с наружными и внутренними каркасно-обшивными стенами, размеры 24,7×16,6 м.	101,23	82,92

значение перемещения составляет $h/70=21600/70=308,57$ мм.

При расчёте зданий с наружными и внутренними стенами и без них, во всех случаях значения перемещений не превышали максимально допустимого предела.

Следует отметить, что замена газобетонной кладки на легкую КОС позволило значительно снизить общую массу здания (таблица 4).

По данным второго пункта таблицы 2.6 КМК 2.01.03-19, в случаях, когда ненесущие элементы зданий защищены от воздействия деформаций несущих конструкций, величина перемещений зданий по оси X и Y допускается в случаях, когда значения перемещений не превышают 1/70 общей высоты здания. Высота исследуемого 5-этажного железобетонного каркасного здания составляет 21,6 м при вертикальном положении несущих элементов. В этом случае максимальное



Таблица 4

Влияние наружных и внутренних стен на общую массу 5-этажного здания

№	Конструктивная система и размеры здания с железобетонным каркасом	Масса здания, тонна
1	5-этажное каркасное здание с наружными и внутренними стенами из газобетона, размеры 24,7×16,6 м.	4 014,46
2	5-этажное каркасное здание без наружных и внутренних стен, размеры 24,7×16,6 м.	3 513,49
3	5-этажное каркасное здание с наружными и внутренними каркасно-обшивными стенами, размеры 24,7×16,6 м.	3 747,09

Из приведенных выше результатов видно, что в 5-этажных железобетонных каркасных зданиях при использовании каркасно-обшивных стен в качестве ограждающих и разделительных стен (перегородок), значения перемещений и сдвигов значительно уменьшаются по сравнению со зданиями где применяются газобетонные стены, а общая масса здания становится легче. Это, в свою очередь, повышает сейсмостойкость здания.

Также проведен анализ расхода арматуры в несущих вертикальных конструкциях – колоннах и горизонтальных конструкциях – ригелях пятиэтажного железобетонного каркасного здания (рис.11-16).

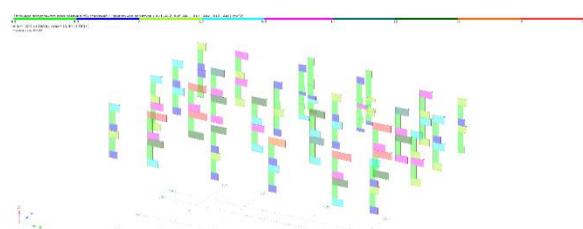


Рисунок 11. Расположение колонн и максимальная площадь армирования в колоннах на четвёртом и пятом этажах пяти этажного каркасного железобетонного здания с внутренними и наружными стенами из газобетона.

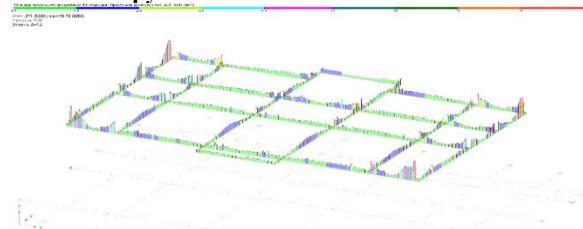


Рисунок 12. Расположение ригелей и максимальная площадь армирования на нижней грани ригелей с первого по пятые этажи пяти этажного каркасного железобетонного здания с внутренними и наружными стенами из газобетона.

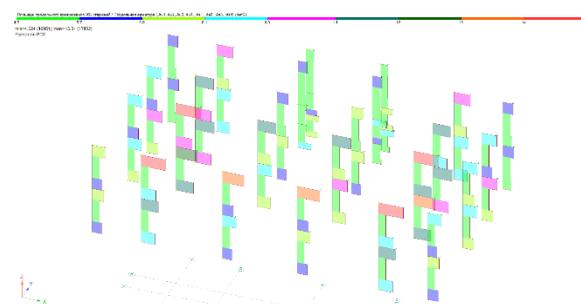


Рисунок 13. Расположение колонн и максимальная площадь армирования в колоннах на четвёртом и пятом этажах пяти этажного каркасного железобетонного здания без внутренних и наружных стен.

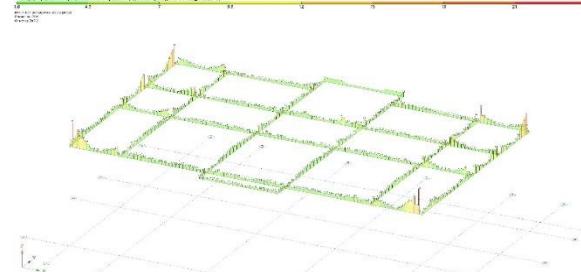


Рисунок 14.. Расположение ригелей и максимальная площадь армирования на нижней грани ригелей с первого по пятые этажи пяти этажного каркасного железобетонного здания бех внутренних и наружных стен.

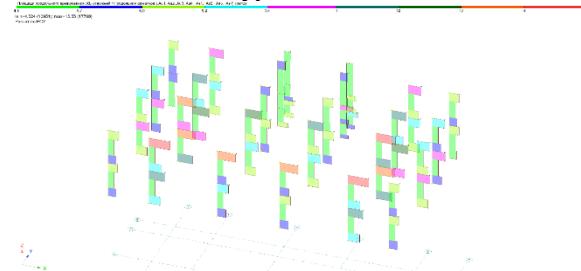


Рисунок 15. Расположение колонн и максимальная площадь армирования в колоннах на четвёртом и пятом этажах пяти этажного каркасного железобетонного здания с внутренними и наружными каркасно-обшивными стенами.

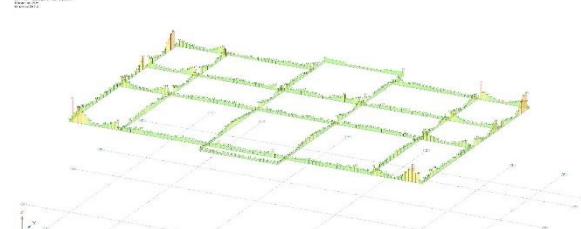


Рисунок 16. Расположение ригелей и максимальная площадь армирования на нижней грани ригелей с первого по пятые этажи пяти этажного каркасного железобетонного здания с внутренними и наружными каркасно-обшивными стенами.

Данный анализ показал, что количество используемой арматуры для несущих колонн и ригелей 5-этажного железобетонного каркасного здания снижается при замене газобетонных стен на КОС

(таблица 5). Не трудно заметить, что расход арматуры при использовании КОС за счет его облегченной массы сопоставим с расходом арматуры для здания "этажерки".

Таблица 5

Расход арматуры в несущих конструкциях колонн и ригелей

№	Конструктивная система и размеры здания с железобетонным каркасом	Расход арматуры в колоннах, тонна	Расход арматуры в ригелях, тонна	Общий расход арматуры для колонн и ригелей здания, тонна
1	5-этажное каркасное здание с наружными и внутренними стенами из газобетона, размеры 24,7×16,6 м.	73,8	107,91	181,7
2	5-этажное каркасное здание без наружных и внутренних стен, размеры 24,7×16,6 м.	64,93	100,53	165,5
3	5-этажное каркасное здание с наружными и внутренними каркасно-обшивными стенами, размеры 24,7×16,6 м.	68,82	102,49	171,3

3. Заключение

1 Создана пространственная модель многоэтажного железобетонного каркасного здания с применением КОС с помощью программного обеспечения ЛИРА СОФТ и проведены численные эксперименты.

2 Определены напряжённо-деформационные состояния многоэтажного железобетонного каркасного здания с применением КОС. Проведён сравнительный анализ напряжённо-деформационного состояния, под воздействием сейсмических и динамических нагрузок зданий с использованием КОС и газобетонных стен.

3 При расчёте зданий с наружными и внутренними стенами и без них, во всех из них значения перемещений не превышали максимально допустимого предела. Однако величина перемещения здания **по оси X** была примерно на **на 4%** выше у здания **с газобетонными стенами** по сравнению со зданием **с каркасно-обшивными стенами**. По сравнению с **каркасным зданием без наружных и внутренних стен** разница была **на 3%** выше чем у здания с каркасно-обшивными стенами.

4 Величина перемещений здания **по оси Y**, была примерно на **4,5%** выше у здания **с газобетонными стенами** по сравнению со зданием **с каркасно-обшивными стенами**. При этом по сравнению с **каркасным зданием без наружных и внутренних стен** разница была всего на **3,5%** больше в здании с каркасно-обшивными стенами.

5 В здании со **стенами из газобетона** общий расход арматуры для колонн и ригелей увеличился примерно на **на 6%** по сравнению со зданием с **каркасно-обшивными стенами**. По сравнению с **каркасным зданием без наружных и внутренних стен**, общий расход арматуры в здании с каркасно-обшивными стенами был больше всего на **3,5%**.

6 При использовании **стен из газобетона** масса 5-этажного здания увеличилось примерно на **на 7,1%** по сравнению со зданием где применяется **каркасно-**

обшивная стена. По сравнению с **массой каркасного здания без наружных и внутренних стен** эта разница в массе была **на 6,6%** больше у здания с каркасно-обшивными стенами.

Использованная литература / References

- [1] «Современное здание. Конструкции и материалы», Большой справочник, 2006.
- [2] Альбом технических решений по применению изделий из автоклавного газобетона торговой марки «Н+Н» в строительстве жилых, общественных и промышленных зданий, Санкт-Петербург, 2011.
- [3] Альбом технических решений КНАУФ АКВАПАНЕЛЬ® Наружная стена. Наружные ненесущие каркасно-обшивные стены с каркасом из стальных тонкостенных холодногнутых оцинкованных профилей с применением материалов КНАУФ, 2020.
- [4] A.A. Khodjaev, I.S. Karimjonov. Modern energy-efficient lightweight external wall structures for multi-storey buildings // Technical science and innovation 2023, №1. p. 59-64.
- [5] Khodjaev A.A., Karimjonov I.S. Reducing the energy consumption of multi-storey buildings by dint of new solutions for external structures // "The Scientific-Practice Journal of Architecture, Construction and Design", 2022, №4. p. 182-187.

Информация о авторах/ Information about the authors

Abbos Khodjayev	Министерство образования, науки и инноваций https://orcid.org/0009-0000-5159-2972
Ibrokhim Karimjonov	Ташкентский государственный транспортный университет, таянч докторанттура изланувчиси https://orcid.org/0009-0001-7326-6382

