

Притоки денежных средств будут формироваться в виде налоговых платежей и социальных отчислений участников проекта по результатам их производственной деятельности, ставшей возможной в результате осуществления проекта [1].

Кроме этого, по итогам проведенной трехсторонней встречи 14 июля 2023 года в формате ВКС стороны договорились проработать вопрос заключения трехстороннего Соглашения о дальнейшей реализации проекта строительства железной дороги «Китай-Кыргызстан-Узбекистан».

В настоящее время сторонами прорабатывается модель финансирования проекта строительства железной дороги Китай-Кыргызстан-Узбекистан [6].

### Список литературы

1. kjd.kg. Официальный сайт Кыргызской железной дороги: – Бишкек 2023 – [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://kjd.kg/ru/>.
2. Официальная страница facebook.com/KyrgyzTemirJolu.  
<https://www.facebook.com/KyrgyzTemirJolu/videos/%D0%BA%D1%8B%D1%82%D0%B0%D0%B9-%D0%BA%D1%8B%D1%80%D0%B3%D1%8B%D0%B7%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%BD-%D3%A9%D0%B7%D0%B1%D0%B5%D0%BA%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%BD-%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B8%D1%80-%D0%B6%D0%BE%D0%BB%D1%83/264675215921715/><https://www.youtube.com/watch?v=ynvnalyFboo>.
3. Железная дорога Китай-Кыргызстан-Узбекистан: перспективы строительства. Официальное выступление премьер министра КР [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.youtube.com/watch?v=NsI9Ztfl99g>.
4. Официальная страница facebook.com/KyrgyzTemirJolu. Китай-Кыргызстан-Узбекистан темир жолу.
5. Официальная страница facebook.com/KyrgyzTemirJolu. Вопросы по дальнейшей реализации проекта строительства железной дороги «Китай-Кыргызстан-Узбекистан»<https://www.facebook.com/100120755058212/posts/808937580843189/?mibextid=rS40aB7S9Ucbxw6v>
6. <https://kabar.kg/news/zheleznaiya-doroga-knr-kr-ruz-v-bishkeke-obsudili-uskorenie-zapuskaprakticheskoi-realizatsii-proekta/>
7. Официальная страница facebook.com/KyrgyzTemirJolu. Проект ж.д. Китай-Кыргызстан-Узбекистан.  
<https://www.facebook.com/100120755058212/posts/776180927452188/?mibextid=rS40aB7S9Ucbxw6v>

УДК 699.841

А.Э. Энсебеков, Д.К. Алиева, Э.Э. Текбаева, А. Суйундук уулу  
И.Раззаков ат. КМТУ, Бишкек, Кыргыз Республикасы  
КГТУ им. И. Раззакова, Бишкек, Кыргызская Республика

A.E. Ensebekov, D.K. Alieva, E.E. Tekbaeva, A. Suiunduk uulu  
Razzakov Univeristy, Bishkek, Kyrgyz Republic  
[a.ensebekov@kstu.kg](mailto:a.ensebekov@kstu.kg), [diku8907@mail.ru](mailto:diku8907@mail.ru), [eliza.tekbaeva@kstu.kg](mailto:eliza.tekbaeva@kstu.kg), [s.aza@list.ru](mailto:s.aza@list.ru).

ПУШОВЕР АНАЛИЗ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО ЗДАНИЯ

## ТЕМИР БЕТОН КУРУЛУШУНУН ПУШОВЕР ТАЛДООСУ

### PUSHOVER ANALYSIS OF REINFORCEMENT CONCRETE BUILDING

Бул изилдөөдө алты кабаттуу темир-бетон имаратынын сейсмикалык реакциясы орун которуштурууну контролдоо менен пушвер анализ (Pushover analysis) методу менен талданат. Имараттын скелети SAP2000 структуралык анализ жана долбоорлоо программасы аркылуу моделденип, талданат. Сызыктуу эмес анализде пластикалык шарнирдин жүрүм - турумун моделдөө үчүн «момент-ийриликти» мамилеси колдонулат. Ошентип, ал устун жана мамыча бөлүктөрү үчүн колдонуучу тарабынан белгиленген муундарды окшоштуруу үчүн иштелип чыккан. Моменттик (M) жана интерактивдүү (P-M) муундар тиешелүүлүгүнө жараша устундун жана мамычанын эки учуна дайындалган. Жогорку жасааттын кыймылы ашыкча жүктөө ийри сызыгын алуу үчүн чектүү кыймылга чейин кадам сайын көбөйүп, пластикалык илгичтердин пайда болуу ырааттуулугу жана устундардын жана мамычалардын бузулушу жазылды. Анализдин натыйжалары, анын ичинде басым ийри сызыгы жана шарнир түзүү талкууланат. Базанын максималдуу жылышы эсептелген базанын жылышынан ашып түштү жана шарнир мамычаларга караганда устундарда эрте пайда болду.

**Түйүндүү сөздөр:** күч ийри сызыгы, шарнир түзүү, жүк жана момент өз ара аракеттенүү ийри сызыгы, момент жана ийри көз карандылык, басым анализи.

В данном исследовании сейсмическая реакция шестиэтажного железобетонного здания анализируется методом пушвер анализа (pushover analysis) с контролем перемещений. Каркас здания смоделирован и проанализирован с помощью программы структурного анализа и проектирования SAP2000. В нелинейном анализе для моделирования поведения пластического шарнира используется зависимость «момент-кривизна». Таким образом, она была разработана для моделирования заданных пользователем шарниров для балочных и колонных сечений. Моментные (M) и интерактивные (P-M) шарниры были назначены на оба конца балки и колонны соответственно. Перемещение верхнего узла увеличивалось шаг за шагом до предельного перемещения, чтобы получить кривую перегрузки, и регистрировалась последовательность образования пластических шарниров и разрушения балок и колонн. Результаты анализа, включая кривую продавливания и образование шарниров, далее обсуждаем. Оказалось, что максимальный сдвиг основания превышает расчетный сдвиг основания, а шарниры образуются в балках раньше, чем в колоннах.

**Ключевые слова:** кривая прочности, образование шарниров, кривая взаимодействия нагрузки и момента, зависимость момента от кривизны, анализ продавливания.

In this study the seismic response of a six storied reinforced concrete building is analysed by displacement controlled pushover analysis. The building frame is simulated and analysed using the structural analysis and design software SAP2000. In nonlinear analysis, moment-curvature relationship is used to model plastic hinge behaviour. Thus it was developed for modelling the user defined hinges for beam and column sections. Moment (M) and interactive (P-M) hinges were assigned to the both ends of beam and column sections respectively. Top node displacement is incremented step by step up to the limiting displacement to obtain the pushover curve and the sequence of formation of plastic hinges and failure of beams and columns were recorded. The analysis results including the pushover curve and hinge formation are discussed. The maximum base shear capacity was found to be higher than the design base shear and hinges were formed in beams prior to columns.

**Key words:** capacity curve, hinge formation, load- moment interaction curve, moment-curvature relationship, pushover analysis.

**Введение.** Из всех опасных природных явлений наибольший ущерб человечеству

может нанести землетрясение. Поскольку силы землетрясения непредсказуемы и случайны по своей природе, необходимо обеспечить надлежащий анализ конструкций, чтобы они могли противостоять таким нагрузкам. Последние разработки в области инженерного проектирования, основанного на оценке эффективности, выдвинули на первый план нелинейный статический анализ или анализ методом смещения. Он пришел на смену традиционным методам анализа благодаря своей простоте и оказался полезным и эффективным инструментом для оценки реальной прочности конструкций. Анализ на продавливание (pushover analysis) может быть как с контролем усилий, так и с контролем перемещений. Анализ смещения позволяет получить представление о слабых звеньях конструкции.

SAP2000 может выполнять статический или динамический, линейный или нелинейный анализ структурных систем. Для проведения анализа смещения в SAP2000 пользователи могут создавать и применять свойства шарниров [1]. Эти интегрированные функции расчетного кода позволяют легко генерировать ветровые, волновые и сейсмические нагрузки с комплексной автоматической проверкой конструкции из стали и бетона.

Анализ смещения (pushover analysis) — это статический нелинейный метод, при котором величина нагрузки на конструкцию увеличивается в боковом направлении в соответствии с определенной заранее заданной схемой. Обычно предполагается, что поведение конструкции контролируется её основным режимом, а заранее заданная схема выражается либо в сдвиге этажа, либо в форме основного режима [2].

В SAP2000 элемент каркаса моделируется как линейный элемент, обладающий линейно упругими свойствами, а нелинейные сила-перемещающие характеристики отдельных элементов каркаса моделируются как шарниры, представленные серией отрезков прямых линий. В SAP2000 существует три типа свойств шарниров [1]. Это свойства шарниров по умолчанию, свойства шарниров, определяемые пользователем, и генерируемые свойства шарниров. Исследования показывают, что определяемая пользователем модель шарнира дает лучшие результаты, чем модель шарнира по умолчанию. Для моделирования поведения пластического шарнира в нелинейном анализе используется зависимость «момент-кривизна». Сейсмостойкость конструкции может быть оценена по кривой проталкивания, образованию пластических шарниров. Максимальный сдвиг основания конструкции можно определить по кривой зависимости сдвига основания от смещения кровли.

**Описание здания.** Для анализа используется несуществующее здание, представляющее собой шестиэтажное здание с высотой между этажами 3,2 м. Предполагается, что здание находится с интенсивностью землетрясения 9 баллов. Здание спроектировано как каркасная модель с заполнением и ограничениями в виде фиксированных колонн первого этажа. Детали здания и расчетные данные приведены ниже. План и разрез каркаса здания показаны на Рисунок 1, 3D-модель на Рисунок 2. Все размеры указаны в мм.

#### **Детали здания:**

- Количество пролетов по оси X: 4
- Количество пролетов по оси Y: 3
- Расстояние между пролетами по осям X и Y: 6000 мм.
- Размер колонны: 400 x 400 мм
- Размер балки: 400 x 300 мм
- Толщина перекрытия: 120 мм

#### **Конструктивные детали:**

- Постоянная нагрузка (dead load):  $4 \text{ кН/м}^2$
- Временная нагрузка (live load):  $1,5 \text{ кН/м}^2$  на крыше и  $2 \text{ кН/м}^2$  на других этажах
- Нагрузка при землетрясении (earthquake load): согласно СН КР 20-02:2018
- Класс бетона: В25 согласно СП 63.13330.2018
- Класс арматуры: 25AIII (A400) согласно СП 63.13330.2018

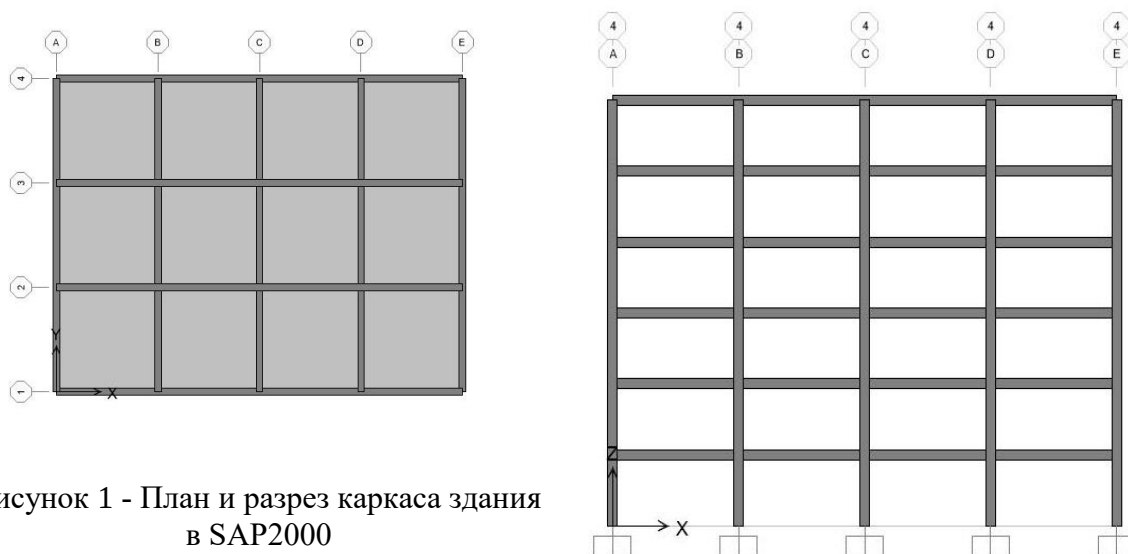


Рисунок 1 - План и разрез каркаса здания  
в SAP2000

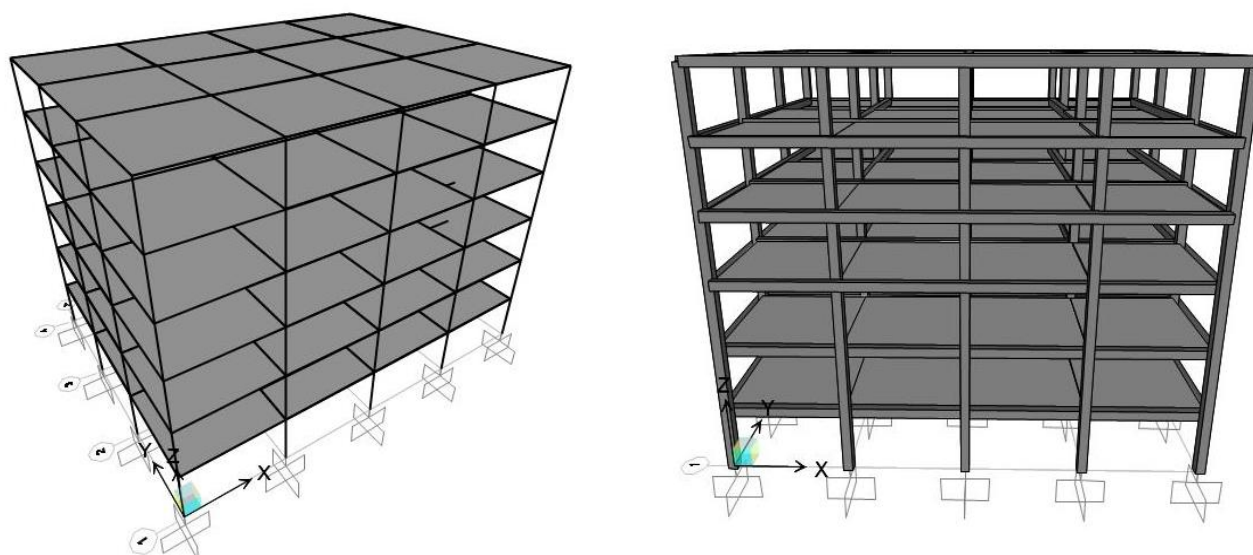


Рисунок 2 - Трехмерная модель здания в SAP2000

**Параметры момент-кривизна.** Зависимость «момент-кривизна» является одним из основных инструментов расчета деформаций в изгибаемых элементах. Она играет важную роль в прогнозировании поведения железобетонных конструкций при изгибе. В нелинейном анализе она используется для моделирования пластического шарнира железобетонных элементов при изгибе. В нелинейном анализе он используется для моделирования поведения пластического шарнира. В качестве материалов при проектировании использовался бетон марки В25 (М350) и стальная арматура 25АIII. Поперечные сечения балки и колонны, использованные для анализа, показаны на

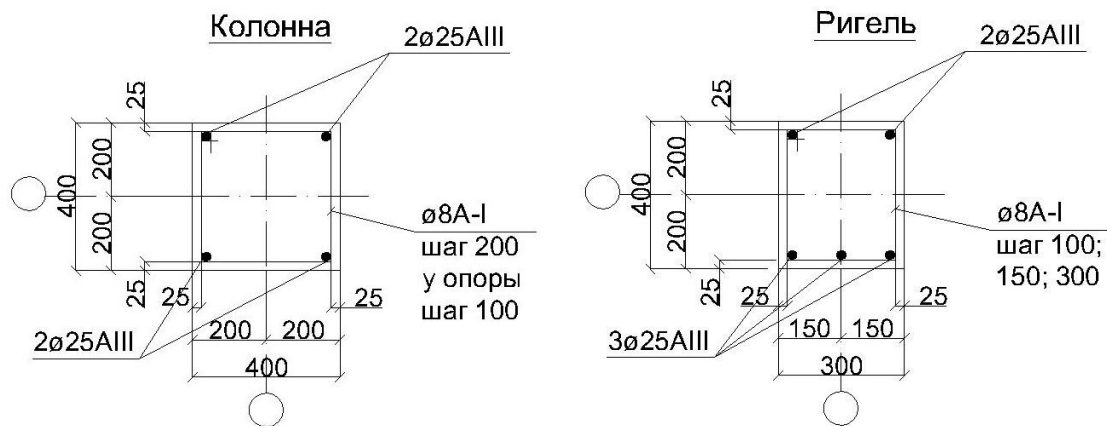


Рисунок 3 - Поперечное сечение колонны и балки

Кривая моментной кривизны для сечений балки и колонны строится для конкретной ограничивающей стали по кривым напряжения-деформации для бетона и стали с использованием итерационного алгоритма. По этим зависимостям были построены кривые моментного ( $M3$ ) и взаимодействующего нагрузочное-моментного ( $P-M2-M3$ ) были определены шарниры, которые были установлены на обоих концах каждой балки и колонны соответственно.

В качестве исходных данных для моделирования свойств шарнира используются параметры момент-кривая, которые можно идеализировать, как показано на Рисунок 4. Основные точки идеализированной кривой «момент-кривизна» можно определить следующим образом:

- Точка А соответствует ненагруженному состоянию.
- Точка В соответствует номинальному пределу текучести и повороту.
- Точка С соответствует пределу прочности и пределу поворота, после которого происходит разрушение.
- Точка D соответствует остаточной прочности, если таковая имеется в конструкции. Обычно она ограничивается 20% от предела текучести, при этом предел поворота может быть принят равным.
- Точка Е определяет максимальную деформационную способность и принимается десятикратной по отношению к пределу текучести.

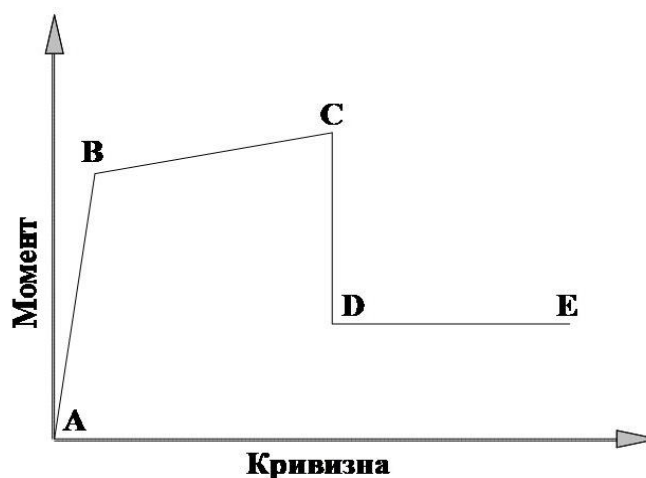


Рисунок 4 - Идеализированная зависимость момента от крутящего момента

**Результат и обсуждение.** Анализ на продавливание проводится при вертикальном нагружении (гравитационная нагрузка) с последующим постепенным увеличением

контролируемой боковой нагрузки в направлении  $x$  и  $y$ . Расчетный сдвиг основания, рассчитанный в соответствии со спецификациями, сравнивается с общей грузоподъемностью конструкции, полученной по кривой проталкивания.

Результаты анализа, включающие кривые проталкивания, последовательность образования шарниров, кратко обсуждаются ниже.

**Кривая продавливания.** Кривая прочности, также известная как кривая продавливания, представляет собой график зависимости сдвига основания от смещения крыши конструкции. Из кривой проталкивания можно получить максимальное перемещение крыши и реакцию основания конструкции при анализе с контролем перемещений. Кривая прочности является хорошим индикатором неупругого поведения здания за пределами упругой стадии. Кривые проталкивания для здания при анализе методом проталкивания с контролем перемещений в направлениях  $x$  и  $y$  показаны на Рисунок 5 и Рисунок 6. Кривая проталкивания показывает, что здание обладает высокой прочностью на сдвиг основания, превышающей расчетный сдвиг основания. Следовательно, здание безопасно для расчетного уровня землетрясения. Расчетный сдвиг основания (base shear) был определен как 228,011 кН и 100,8 кН для нагрузок по осям  $x$  и  $y$ , а соответствующие значения, полученные из кривых проталкивания (pushover curves), составляют 232,127 кН и 101,408 кН соответственно. Мощность сдвига основания здания оказалась на 1,8% и 0,6% выше расчетного сдвига основания для нагрузок по осям  $x$  и  $y$  соответственно. Максимальное перемещение крыши составило 443,9 мм и 420 мм для нагрузок по осям  $x$  и  $y$  соответственно.

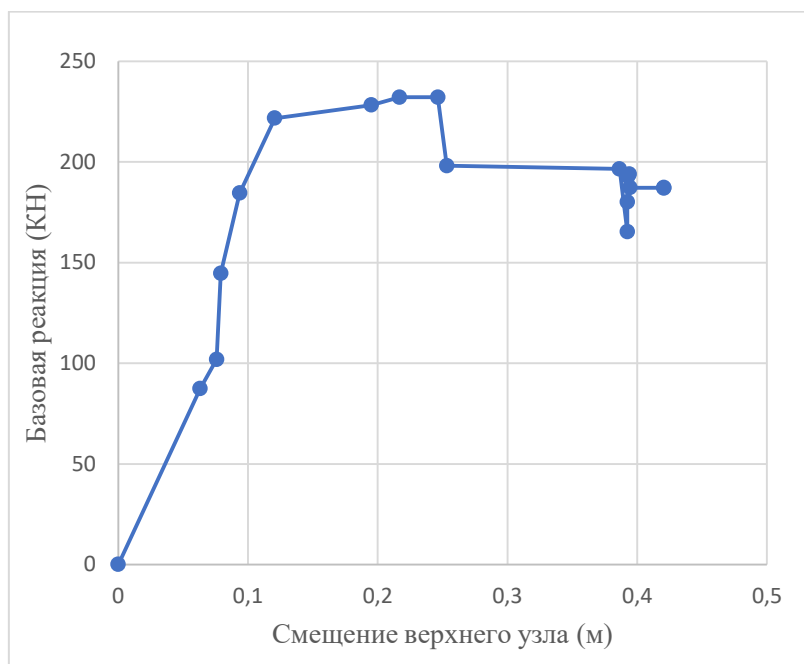


Рисунок 5 - Кривая продавливания для нагрузки по оси  $x$

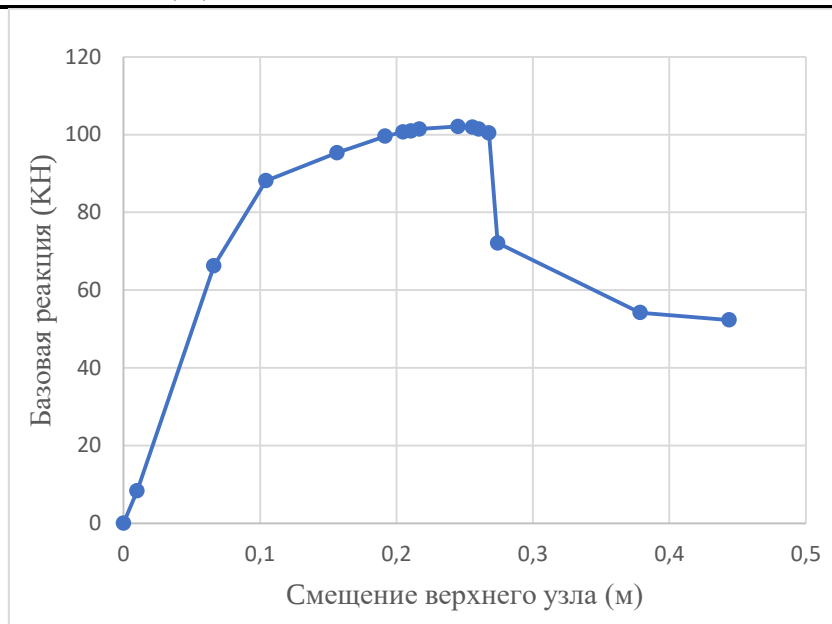
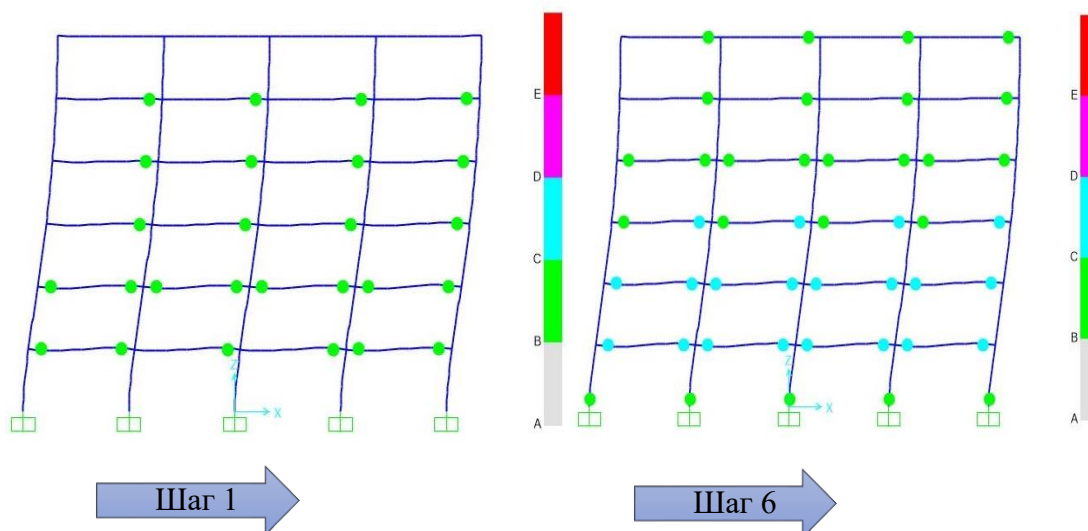


Рисунок 6 - Кривая продавливания для нагрузки по оси y

**Образование шарнира.** Результат анализа на продавливание показывает последовательность образования пластического шарнира и его состояние на различных уровнях эксплуатационных характеристик здания. Это дает информацию о наиболее слабом элементе конструкции. Таким образом, можно определить элемент, который необходимо усилить в случае необходимости модернизации здания [6].

Соответствующая детализация элементов может быть выполнена для достижения желаемой модели разрушения элементов при сильных землетрясениях. Критерии приемлемости НЗ (немедленное заселение), БЖ (безопасность жизнедеятельности) и ПО (предотвращение обрушения) обозначаются разными цветами, чтобы показать состояние шарнира на различных стадиях. Анализ на продавливание проводится с контролем перемещений, при этом максимальное перемещение увеличивается шаг за шагом. Для получения наглядного представления о формировании шарниров на каждом этапе приращения перемещений выбрано большее значение кратности шагов. На Рисунок 7 и Рисунок 8 показано образование шарниров для различных случаев. В случае анализа надвигания при нагрузке по оси x максимальное перемещение было получено за 14 шагов приращения, а при нагрузке по оси y - за 15 шагов приращения. Последовательность образования шарниров показывает, что во всех случаях механизм разрушения в балках происходит раньше, чем в колоннах. В соответствии с концепцией «сильная колонна - слабая балка» данный механизм разрушения является адаптированным.



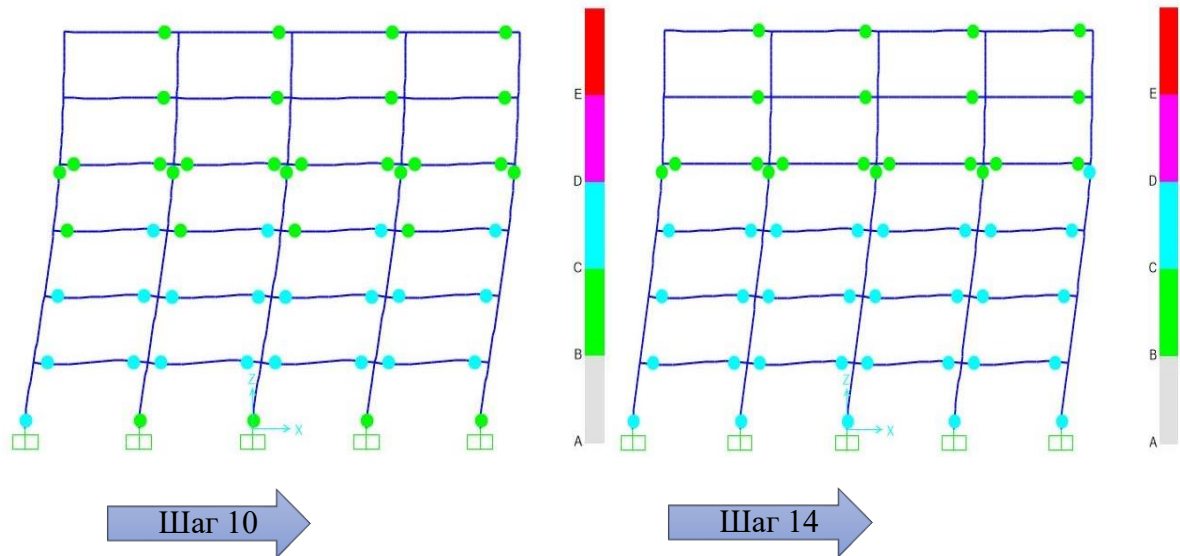


Рисунок 7 - Образование шарниров для рамы, нагруженной в направлении  $x$

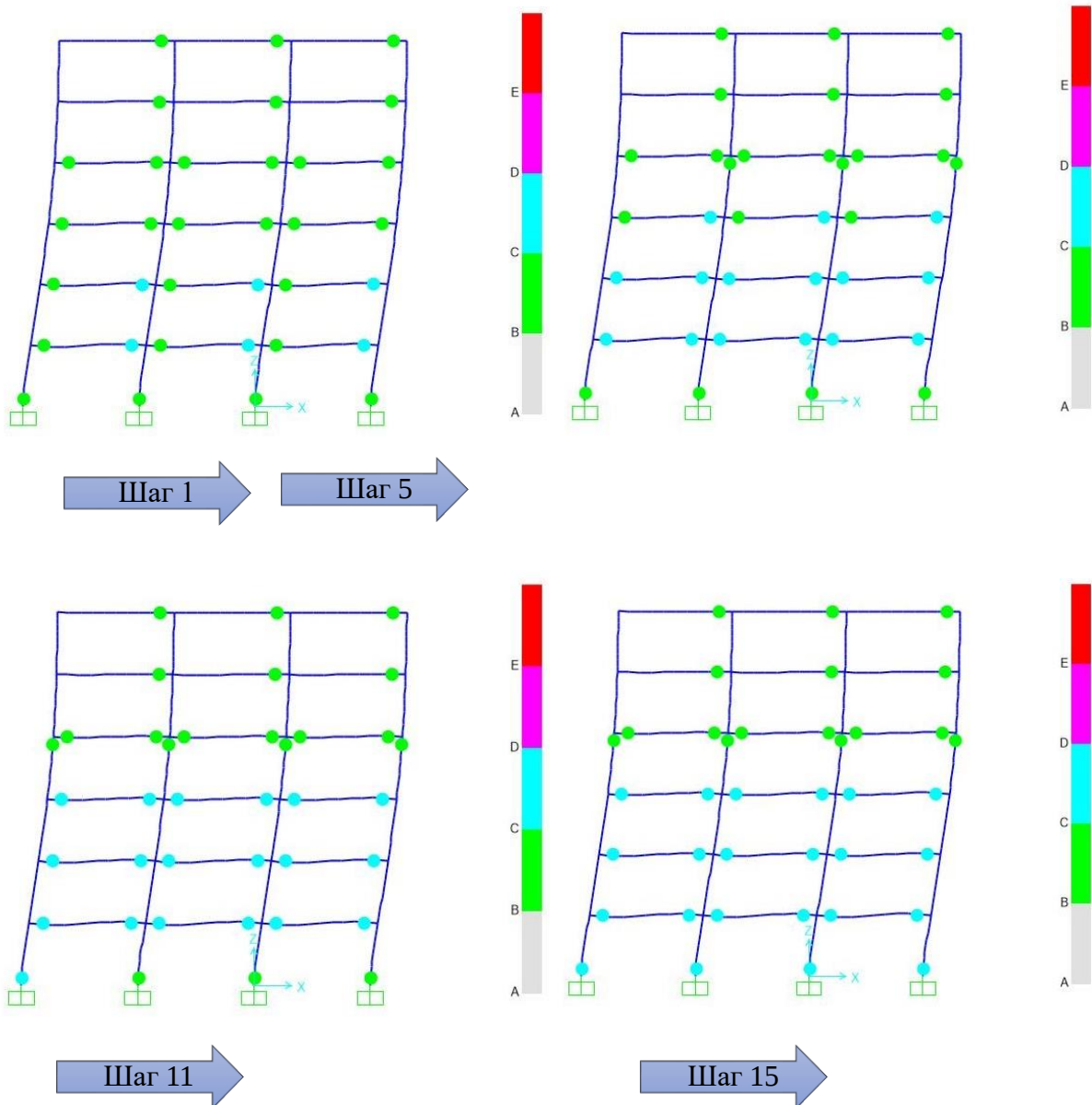


Рисунок 8 - Образование шарнира для рамы, нагруженной в направлении  $y$

Таблица 1 - Смещение и нагрузки по осям X и Y

| Нагрузки          | Максимальное смещение<br>(м) | Максимальный базовый<br>сдвиг<br>(кН) |
|-------------------|------------------------------|---------------------------------------|
| Загрузка по оси X | 0,443                        | 232,127                               |
| Загрузка по оси Y | 0,420                        | 101,408                               |

**Закключение.** Анализ на продавливание является идеальным методом исследования нелинейного поведения конструкции.

Зависимость между моментом и кривизной является важным инструментом для определения заданных пользователем свойств пластических шарниров сечений. Кривая взаимодействия нагрузки и момента необходима для определения шарниров колонн. Во всех случаях максимальный сдвиг основания превышал расчетный сдвиг основания. Последовательность образования шарниров показала, что локальное разрушение происходит в балках раньше, чем в колоннах. Шарниры образовались в пределах уровня безопасности жизнедеятельности для нагрузок по оси X и Y соответственно. Здание является приемлемым и безопасным для предполагаемого уровня землетрясения с точки зрения прочности на сдвиг основания.

### Список литературы

1. Руководство по SAP2000 (версия 25), «CSI getting started with SAP2000», Computers and Structures, Inc. Berkeley, USA.
2. АТС-40, «Сейсмическая оценка и модернизация бетонных зданий», Совет по прикладным технологиям. – Калифорния: Том 1, 1996.
3. ASCE 41-06(2007), «Сейсмическая реабилитация существующих зданий», Американское общество инженеров-строителей. - Вирджиния, США.
4. FEMA 356, «Предварительный стандарт и комментарии для сейсмической реабилитации зданий», Федеральное агентство по управлению чрезвычайными ситуациями и Американское общество инженеров-строителей, ноябрь 2000 г.
5. СН КР 20-02:2018 «Сейсмостойкое строительство» Нормы проектирования.
6. Шинде, Д.Н. Анализ продавливания многоэтажного здания [Текст] / Д.Н. Шинде, Н.В. Вина, Ю.М. Пудале // Международный журнал исследований в области техники и технологий. – 2014. - Том 3. - с. 691-693.

УДК 699.841

**А.Э. Энсебеков, Д.К. Алиева, Ж.Д. Кыдырова, Э.К. Сулайманов**  
 И.Раззаков ат. КМТУ, Бишкек, Кыргыз Республикасы  
 КГТУ им. И. Раззакова, Бишкек, Кыргызская Республика

**A.E. Ensebekov, D.K. Alieva, Zh.D. Kydyrova, E.K. Sulaimanov**  
 Razzakov Univeristy, Bishkek, Kyrgyz Republic  
[a.ensebekov@kstu.kg](mailto:a.ensebekov@kstu.kg), [diku8907@mail.ru](mailto:diku8907@mail.ru), [j.kydyrova@kstu.kg](mailto:j.kydyrova@kstu.kg), [sulaimanov-ernis@mail.ru](mailto:sulaimanov-ernis@mail.ru)

**ТЕМИР-БЕТОН КАРКАС СИСТЕМАСЫНЫН  
 СЕЙСМИКАЛЫК ТУРУКТУУЛУГУН ЖАНА СЕЙСМИКАЛЫК  
 ИЗОЛЯЦИЯ ЫКМАЛАРЫН ИЗИЛДӨӨ**