

Проведено експериментальне дослідження напружено-деформованого стану залізобетонного макету будівлі при виході з ладу колони першого поверху. Аналізується вплив процесу прогресуючого обвалення на каркас макету. Завантаження макету будівлі проходило поетапно, починаючи з верхнього сьомого поверху. Визначалися деформації сусідніх колон і переміщення примикаючих перекриттів. Встановлено інтенсивне наростання деформацій в зоні колони, що видалється, і зменшення їх на видалених ділянках

Ключові слова: напружено-деформативний стан макету елементів залізобетонного каркаса, прогресуюче руйнування

Проведено експериментальное исследование напряженно-деформированного состояния железобетонного макета здания при выходе из строя колонны первого этажа. Анализируется влияние процесса прогрессирующего обрушения на каркас макета. Загрузка макета здания происходила поэтапно, начиная с верхнего седьмого этажа. Определялись деформации соседних колонн и перемещения примыкающих перекрытий. Установлено интенсивное нарастание деформаций в зоне удаляемой колонны и уменьшение их на удаленных участках

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние макета элементов железобетонного каркаса, прогрессирующее обрушение

УДК 624.042: 624.046

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.50348

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО ЗДАНИЯ В СЛУЧАЕ ПРОГРЕССИРУЮЩЕГО ОБРУШЕНИЯ

А. Н. Шаповалов

Кандидат технических наук, доцент*

E-mail: ashapovnik@gmail.com

В. В. Руденко

Аспирант*

E-mail: rudikv@ukr.net

*Кафедра строительных конструкций

Харьковский национальный университет

городского хозяйства им. А. Н. Бекетова

ул. Революции, 12, г. Харьков, Украина, 61002

1. Введение

Вопросы учета надежности и безопасности эксплуатации зданий и сооружений при различных неблагоприятных условиях приобрели в настоящее время весьма актуальное значение [1]. К числу таких неблагоприятных условий относится и процесс прогрессирующего (лавинобразного) обрушения всего здания или только определенной его части [2], когда выходят из строя отдельные его элементы [3].

Выполнено достаточно обширное теоретическое исследование в этом направлении [4, 5], однако экспериментальных исследований, как в отечественной практике, так и в зарубежной, весьма ограничено [6], а по отдельным конструктивным элементам, в частности, колоннам и диафрагмам вообще отсутствует. В существующей экспериментальной практике строительства весьма особое внимание необходимо уделить работе [7] иностранных исследователей, где авторы акцентируют внимание на проблеме работы перекрытий в поврежденном каркасе, при этом не уделяется особое внимание колоннам при эффекте прогрессирующего обрушения. Совершенно не отражается в существующих экспериментальных данных явление приспособляемости конструкций, т. е. способность здания перераспределять усилия, к различным аварийным ситуациям. На процесс

приспособляемости большое влияние оказывает конструктивное решение здания, в частности компоновка каркаса и расположение диафрагм жесткости [8].

2. Анализ литературных источников и постановка проблемы

С точки зрения теоретических исследований в работе [9] можно пронаблюдать глубокий и обширный анализ напряженно-деформированного состояния конструкций монолитных каркасных зданий при учете фактора прогрессирующего обрушения, но здесь при этом не наблюдаются вариации различных расчетных моделей. Такие расчетные модели и возможность их анализа указаны в работе [10]. В свою очередь, в ряде исследований [11–13] изложены основные принципы расчета напряженно-деформированного состояния несущих элементов конструкций на основе учета поэтапного изменения расчетной схемы, включая геометрию системы, модель внешних связей и модель загружений. А в работе [14] по предлагаемой математической модели предоставляется возможность анализа расчета несущей способности системы многоэтажного здания и исследование напряженно-деформированного состояния системы в возрасте 10, 20, 50 и 100 лет.

В свою очередь, с точки зрения экспериментальных исследований в области оценки напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций в случае прогрессирующего обрушения, на сегодняшний день проведен ряд экспериментов. Так, например, в «Hunan University» Китая были произведены исследования [15] имитации прогрессирующего обрушения четырехэтажной пространственной конструкции после удаления угловой колонны. Исследователями было отмечено, что с возрастанием вертикальной нагрузки постепенно снижалась предельная несущая способность перекрытий в вертикальном направлении. Структура излома показала, что угловое соединение конструкции колонны, потерявшей устойчивость, имело большой угол поворота вне плоскости, и было сильно повреждено. Сравнивая результаты эксперимента, участники пришли к выводу, что процесс смещения в испытательной установке возник не из-за потери равновесия у самой конструкции, а из-за потери устойчивости у арматурного стержня в основании балочной плиты. В свою очередь устойчивость плиты, работающей по балочной схеме, в случае прогрессирующего обрушения полностью видоизменяется с увеличением отклонения от вертикали.

Все проанализированные материалы по исследованию процесса разрушения относятся в основном к перекрытиям [16] и практически не затрагивают вопросы напряженно-деформированного состояния колонн [17]. В силу этого представляется интересным как с теоретической, так и с практической точек зрения, более глубокое исследование проблемы влияния процесса разрушения одной колонны на напряженное состояние окружающих ее колонн, а также проблема взаимосвязи между элементами внутренних связей, в частности диафрагм жесткости с напряженным состоянием колонн.

3. Цель и задачи исследования

Целью работы является оценка напряженно-деформированного состояния каркасного железобетонного макета здания при выходе из строя колонны первого этажа с учетом влияния прогрессирующего обрушения.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

- выявить особенности работы поврежденного макета здания;
- выполнить расчет монолитного многоэтажного каркаса в упругой стадии при внезапном удалении колонны первого этажа;
- произвести качественную и количественную оценку изменения внутренних усилий в колоннах первого этажа каркаса при выходе из строя центральной колонны крайнего ряда.

4. Объект исследования и методика измерений деформаций в колоннах железобетонного макета здания

4.1. Объект исследования и оборудование, которое использовалось в эксперименте

Конструктивной схемой экспериментальной модели семиэтажного каркаса здания являлась модель с размерами в плане 2x2 м и общей высотой 2,260 м. Каркас симметричен с пролетами 0,5 м и ячейкой

колонн 0,5x0,5 м (рис. 1). Сечение железобетонных колонн в каркасе равно 50x50 мм (аналог сечения реальных колонн 400x400 мм). Толщина плит перекрытия 35 мм. Сопряжение плит перекрытия с колоннами осуществлялось жесткое за счет специальных уголковых закладных деталей, жестко соединенных металлическими хомутами-обоймами с колоннами. Устойчивость каркаса модели обеспечивалась металлическими связями, установленными симметрично в центральной части модели здания по всей высоте в виде крестообразного расположения.

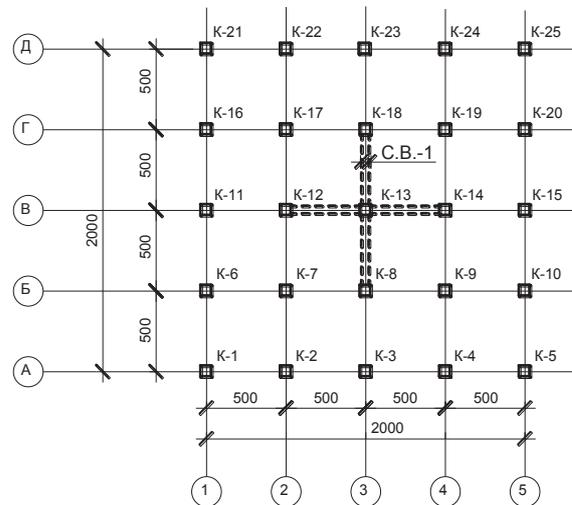


Рис. 1. План экспериментальной модели

Приборметрическое обеспечение выполнялось с помощью индикаторов часового типа, предназначенных для измерений абсолютных линейных перемещений и контроля отклонения от заданной геометрической формы конструкции. Индикаторы устанавливались на колонны железобетонного макета здания с целью проверки напряженно-деформированного состояния конструкции в целом. Для фиксации индикатора с колонной использовался уголок с двойной полкой размером 30x20x5 мм (рис. 2). Основное внимание в проведении эксперимента уделялось деформациям колонн и дополнительное – плитам перекрытий. Для проверки напряженного-деформированного состояния плит перекрытий использовали прогибомеры марки «ПАО-6». Загрузка модели выполнялась штучными бетонными элементами с предварительным взвешиванием каждого из них. В среднем вес одного загрузочного блока составлял 50–60 кг.



Рис. 2. Крепление индикатора к колонне

4. 2. Методика создания эффекта внезапного разрушения колонн

Для создания эффекта внезапного разрушения были изготовлены колонны первого этажа с элементами разрушения в сечениях колонн (аналог выхода колонны из строя). В колонне устанавливались конусообразные вкладки, зажатые прямоугольной металлической обоймой. В процессе проведения эксперимента определялись деформации и перемещения элементов здания (колонн и перекрытий) как в зоне интенсивного нагружения и разрушения, так и на удаленных участках всей модели для фиксации возможного перераспределения усилий. Схема нагружения макета представлена на рис. 3. Загружение происходило в три этапа:

1 этап – прикладывалась равномерно распределенная нагрузка $p_1=15 \text{ кН/м}^2$ только на седьмом этаже;

2 этап – к существующей нагрузке p_1 добавлялись на все этажи (кроме седьмого) равномерно распределенную переменную нагрузку $p_2= 2,4 \text{ кН/м}^2$;

3 этап – к существующей нагрузке на седьмом этаже $p_1=15 \text{ кН/м}^2$ добавляли $p_1=10 \text{ кН/м}^2$, а к нагрузке $p_2=2,4 \text{ кН/м}^2$ каждый этаж был догружен равномерно распределенной нагрузкой $p_2=1,1 \text{ кН/м}^2$, что составило общую нагрузку на каждом этаже по $3,5 \text{ кН/м}^2$.

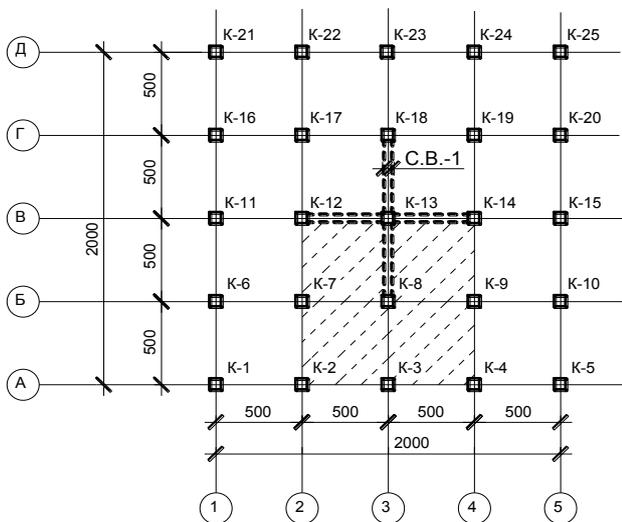


Рис. 3. Схема нагружения экспериментальной модели

После каждого из перечисленных этапов нагружения фиксировались отсчеты по приборам. При мгновенном удалении колонны, которое осуществлялось выбиванием центрирующего конусообразного вкладыша, определялись деформации соседних колонн первого, а также последующих этажей.

5. Результаты исследований проведенного эксперимента

Результаты эксперимента при первом варианте нагружения модели здания представлены в табл. 1, где помимо величин загрузки перекрытий указаны показания приборов и разница отсчетов между каждым этапом загрузки ($\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \Delta_4$). Установка приборов, по которым производились замеры де-

формаций, приведена на рис. 4. При этом приборы устанавливались таким образом, чтобы максимально охватить зону влияния удаляемой колонны на соседние элементы и выборочно для удаленных колонн к колонне, подверженной прогрессирующему обрушению.

Таблица 1

Показания приборов при первом варианте загрузки

Прибор №	Нулевой отсчет	1-ое загр. 15 кН/м ² (7 эт.)	Δ_1	2-ое загр. 15 кН/м ² (7 эт.)+2,4 кН/м ² (1, 2, 3, 4, 5, 6 эт.)	Δ_2	3-е загр. 25 кН/м ² (7 эт.)+3,5 кН/м ² (1, 2, 3, 4, 5, 6 эт.)	Δ_3	Удаление колонны «К-3»	Δ_4
И-1	452	450	-2	449	-1	445	-4	449	4
И-2	758	768	10	775	7	784	9	803	19
И-3	708	720	12	724	4	730	6	744	14
И-4	510	514	4	517	3	520	3	522	2
И-5	460	465	5	467	2	473	6	470	-3
И-6	428	432	5	436	3	438	2	441	3
И-7	600	603	3	605	2	609	4	610	1
И-8	82	84	2	85	1	87	2	87	0
И-9	719	721	2	721	0	723	2	720	-3
И-10	880	881	1	883	2	885	2	884	-1
И-11	814	819	5	820	1	825	5	826	1
И-12	184	187	3	187	0	189	2	187	-2
И-13	572	585	13	592	7	601	9	615	14
И-14	19	24	5	26	2	29	3	33	4
И-15	71	72	1	73	1	75	2	77	2
И-16	669	670	1	671	1	673	2	675	2
И-17	659	660	1	661	1	663	2	664	1
И-18	889	891	2	892	1	894	2	896	2
И-19	256	257	1	259	2	261	2	263	2
И-20	824	825	1	825	0	826	1	825	-1
И-21	187	188	1	188	0	189	1	190	1
И-22	657	659	2	659	0	660	1	661	1
И-23	442	443	1	443	0	444	1	444	0
И-24	172	173	1	173	0	173	0	174	1
И-25	146	146	0	146	0	146	0	145	-1
И-26	178	179	1	179	0	179	0	178	-1
И-27	998	999	1	999	0	999	0	998	-1
И-28	182	180	-2	179	-1	177	-2	176	-1
И-29	575	579	4	561	2	563	2	566	3
П-1	916	900	16	893	7	880	13	898	18
П-2	795	785	10	781	4	770	11	777	7
П-3	166	183	17	172	11	162	10	169	7
П-4	998	979	19	970	9	959	11	979	20
П-5	690	669	21	650	19	636	14	641	5
П-6	569	555	14	545	10	536	9	548	12

Следует отметить, что после выхода из строя центральной колонны первого этажа крайнего ряда К-3

показания приборов значительно увеличились в тех колоннах, которые расположены в одной ячейке с удаляемой колонной, то есть в непосредственной близости к ней.

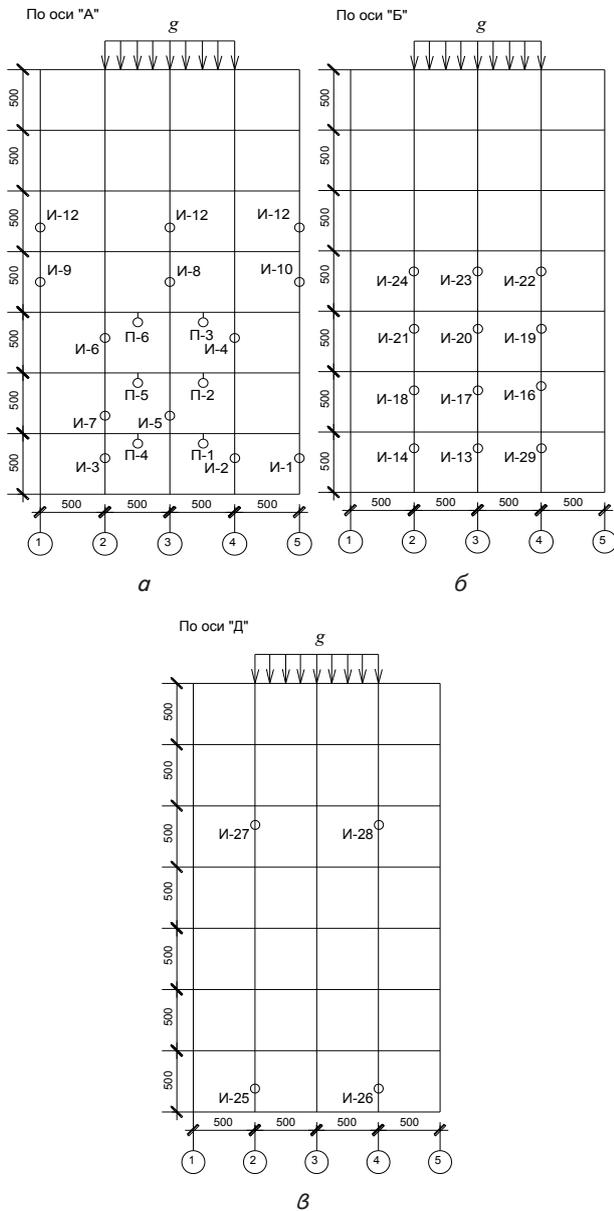


Рис. 4. Расположение приборов на экспериментальной модели: а – по оси «А»; б – по оси «Б»; в – по оси «Д»

На основании обработки экспериментальных данных получены графики зависимости деформаций ϵ от напряжений σ для колонн «К-2» и симметричной ей колонне «К-4», «К-7» и симметричной ей колонне «К-9» а также для колонны «К-8» (рис. 5–7).

Исходя из полученных данных (рис. 5–7), можно пронаблюдать четкую картину роста деформаций при увеличениях внешней нагрузки на колонны, расположенные в ячейке с планируемой для удаления колонной, что свидетельствует о правильности размещения внешней нагрузки и соответствующей схеме развития деформаций.

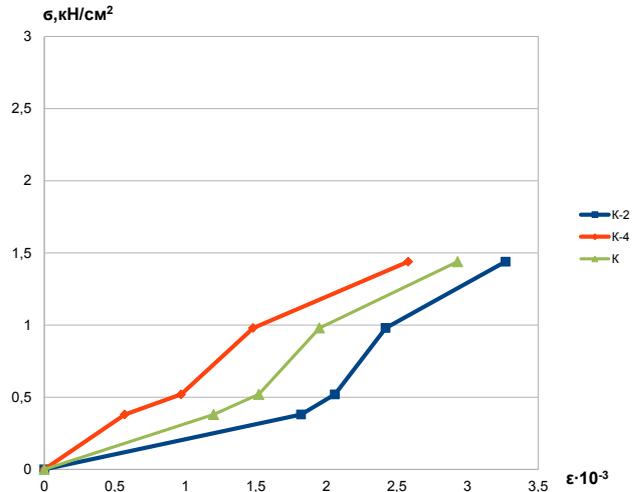


Рис. 5. Зависимость деформаций колонн «К-2» и «К-4» от внешних напряжений

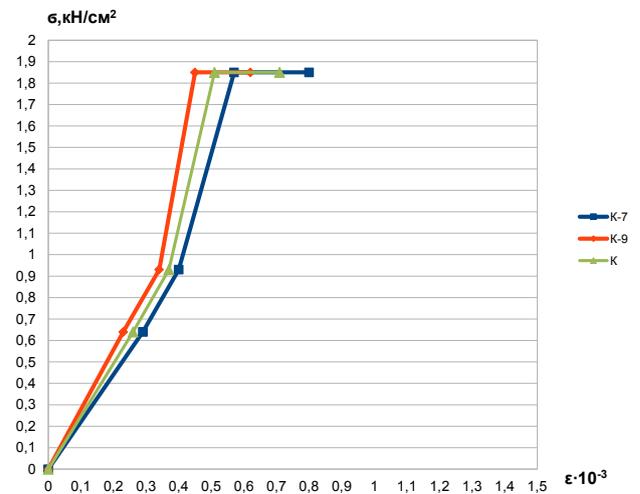


Рис. 6. Зависимость деформаций колонн «К-7» и «К-9» от внешних напряжений

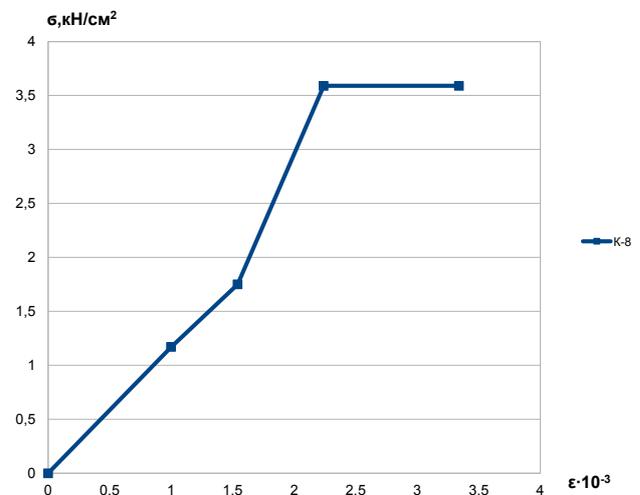


Рис. 7. Зависимость деформаций колонны «К-8» от внешних напряжений

6. Анализ напряженного состояния колонн 1-ого этажа

Анализируя напряженное состояние колонн 1-ого этажа при поэтапном нагружении модели, деформации в бетоне на каждом этапе возрастали в среднем на $0,5 \cdot 10^{-3}$. Для обеспечения надежности полученных данных показания снимались в двух симметричных колоннах К-2 и К-4, а затем принималось среднее значение деформаций.

Развитие деформаций колонн на удаленных участках практически не наблюдалось. Отмечалось пропорциональное нарастание деформаций с ростом нагрузки, а на крайних колоннах (К-1, К-5, К-6, К-10) наблюдались деформации растяжения.

После удаления из каркаса колонны К-3 происходит интенсивное нарастание деформаций в соседних колоннах К-7 и К-9 при сохранении для них условной грузовой площади и стабильного напряжения, в то время, как для колонн К-2 и К-4 происходит увеличение и напряжений (вследствие увеличения грузовой площади), и сравнительно небольшой прирост деформаций до $1 \cdot 10^{-3}$. Это видно из представленного графика (рис. 5).

Очень важно было отметить, что лавинообразное нарастание деформаций колонн и перекрытий при имитации прогрессирующего обрушения не происходило. Система модели всего каркаса и расположенные в ней связи приводили к перераспределению усилий во всей системе, а также к приспособляемости каркаса к внешним воздействиям и внезапному удалению колонны. Спустя 2 часа после удаления колонны показания приборов практически не изменились.

7. Выводы

Таким образом, на основании проведенных экспериментальных исследований на модели семиэтажного каркасного железобетонного здания, по полученным результатам можно сделать следующие выводы:

1. При имитации процесса прогрессирующего обрушения наблюдается явление нарастания деформаций колонн, расположенных в непосредственной близости от удаляемой колонны (ось А).

2. Нарастание деформаций соседних колонн на следующей оси (ось Б) не происходит лавинообразно, а развивается плавно и составляет увеличение на 30–40 % по сравнению с ростом деформаций при спокойном поэтапном пропорциональном нагружении.

3. Установка элементов жесткости каркаса (диафрагм жесткости или металлических связей) существенно снижает опасность обрушения всего здания в связи с перераспределением внутренних усилий.

4. Увеличение армирования несущих элементов каркаса первого этажа с учетом явления прогрессирующего обрушения следует производить с учетом эффекта перераспределения усилий и работы системы внутренних элементов жесткости. В обычных регулярных железобетонных каркасных системах процент увеличения площади арматуры колонн может не превышать 15–20 % от площади, определенной без учета влияния эффекта прогрессирующего обрушения.

Литература

1. Кабанцев, О. В. Расчет конструкций многоэтажных и высотных железобетонных зданий с учетом изменения основных параметров расчетной модели в режимах возведения в эксплуатации [Текст]: 3-я Всерос. (2-я Межд.) конф. / О. В. Кабанцев // Бетон и железобетон взгляд в будущее. – 2014. – Т. 1. – С. 282–292.
2. Алмазов, В. О. Проблемы сопротивления зданий прогрессирующему разрушению [Текст] / В. О. Алмазов, А. И. Плотников, Б. С. Расторгуев // Вестник МГСУ. – 2011. – № 2. – С. 15–20.
3. Люблинский, В. А. Безопасность несущих систем зданий при локальном изменении жесткостных характеристик несущих элементов [Текст]: 3-я Всерос. (2-я Межд.) конф. / В. А. Люблинский, А. Г. Тамразян // Бетон и железобетон взгляд в будущее. – 2014. – Т. 1. – С. 90–99.
4. Методика расчета монолитных жилых зданий на устойчивость против прогрессирующего обрушения. Научно-технический отчет [Текст]. – М.: МНИИТЭП, 2004. – 40 с.
5. Choi, H. J. Investigation of Progressive Collapse Phenomenal in a Multi Story Building [Text] / H. J. Choi, T. Krauthamer // 11 th International Symposium on the Interaction of the Effects of Munitions with Structures, Mannheim. – Germany, 2003.
6. Stephen, M. S. Experimental Evaluation of Disproportionate Collapse Resistance in Reinforced Concrete Frames [Text] / M. S. Stephen, L. O. Sarah // ACI Structural journal. – 2013. – Vol. 110, Issue 3. – P. 521–529. doi: 10.14359/51685609
7. Ghannoum, W. M. Dynamic Collapse Analysis of a Concrete Frame Sustaining Column Axial Failures [Text] / W. M. Ghannoum, J. P. Moehle // ACI Structural journal. – 2012. – Vol. 109, Issue 3. – P. 403–412. doi: 10.14359/51683754
8. Шаповалов, А. Н. Влияние диафрагм жесткости на распределение усилий в каркасах зданий при учете фактора прогрессирующего обрушения [Текст]: 7-я Всеукр. науч.-техн. конф.; в 2х кн. К. 1 / А. Н. Шаповалов, В. В. Руденко // Научно-технические проблемы современного железобетона. – Киев, 2013. – С. 76–83.
9. Обозов, В. И. Анализ напряженно-деформированного состояния конструкций монолитных каркасных зданий в аварийных ситуациях [Текст] / В. И. Обозов, А. Ф. Беляев // Строительная механика и расчет сооружений. – 2009. – № 2.
10. Перемутьер, А. В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа [Текст] / А. В. Перемутьер, В. И. Сливкер. – Киев, 2002. – 598 с.
11. Плотников, А. И. Расчет несущих конструкций монолитных железобетонных зданий на прогрессирующее разрушение с учетом динамических эффектов [Текст]: сб. науч. тр. / А. И. Плотников, Б. С. Расторгуев // Институт строительства и архитектуры МГСУ. – 2008. – С. 127–135.
12. Расторгуев, Б. С., Мутко, К. Н. Деформирование конструкций перекрытий каркасных зданий после внезапного разрушения одной колонны [Текст] / Б. С. Расторгуев, К. Н. Мутко // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2006. – № 1. – С. 12–15.

13. Расторгуев, Б. С. Методы динамического расчета зданий на устойчивость против прогрессирующего разрушения [Текст] / Б. С. Расторгуев // Вестник отделения строительных наук РААСН. – 2009. – Т. 1, Вып. 13.
14. Тамразян, А. Г., Филимонова Е. А. Оптимизация железобетонных конструкций с учетом анализа риска на примере железобетонной плиты перекрытия [Текст]: 3-я Всерос. (2-я Межд.) конф. // Бетон и железобетон взгляд в будущее. – 2014. – Т. 1. – С. 365–378.
15. He, Q. Effects on Response of Reinforced Concrete Substructures after Loss of Corner Column [Text] / Q. He, W. Yi // ACI Structural journal. – 2013. – Vol. 110, Issue 5. – P. 893–896.
16. Тихонов, И. Н., Мешков В. З. Армирование железобетонных конструкций с целью предотвращения прогрессирующего обрушения [Текст]: 3-я Всерос. (2-я Межд.) конф. // Бетон и железобетон взгляд в будущее. – 2014. – Т. 1. – С. 379–388.
17. Чанг, К. К. Последнее исследования в области железобетонных конструкций в национальном исследовательском центре сейсмостойкого строительства, Тайвань [Текст]: 3-я Всерос. (2-я Межд.) конф. / К. К. Чанг // Бетон и железобетон взгляд в будущее. – 2014. – Т. 2. – С. 161–173.

В рамках ізольованої системи, яка здійснює плоский рух і складена з обертового статично незрівноваженого несучого тіла та двох однакових математичних маятників, відносно руху яких перешкоджають сили в'язкого опору, досліджується умовна стійкість усталених рухів. Встановлено, що умовно асимптотично стійкими є окремі основні рухи, якщо вони ізольовані, чи сім'я, або псевдосім'я основних рухів

Ключові слова: несуче тіло, маятники, стійкість руху, космічний апарат, пасивний автобалансир, демпфер

В рамках изолированной системы, совершающей плоское движение и состоящей из вращающегося статически неуравновешенного несущего тела и двух одинаковых математических маятников, относительно движению которых препятствуют силы вязкого сопротивления, исследуется условная устойчивость установившихся движений. Установлено, что условно асимптотически устойчивыми являются отдельные основные движения, если они изолированы, или семья, или псевдосемья основных движений

Ключевые слова: несущее тело, маятники, устойчивость движения, космический аппарат, пассивный автобалансир, демпфер

УДК 531.38+531.36

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.49269

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ УСТАНОВИВШИХСЯ ДВИЖЕНИЙ ИЗОЛИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ, СОВЕРШАЮЩЕЙ ПЛОСКОЕ ДВИЖЕНИЕ

В. В. Пирогов

Кандидат физико-математических наук, доцент
Кафедра деталей машин и прикладной механики
Кировоградский национальный
технический университет
пр. Университетский, 8,
г. Кировоград, Украина, 25006
E-mail: vladimir-pirogovvv@rambler.ru

1. Введение

В идеальном случае космический аппарат (КА) или искусственный спутник Земли (ИСЗ) стабилизируемый вращением должен вращаться вокруг своей продольной оси, являющейся главной центральной осью инерции. Из-за неточного придания начального вращения КА или ИСЗ, а также из-за неуравновешенности относительно его продольной оси, возникают линейные и угловые отклонения (угол нутации) продольной оси от оси его вращения. Для уменьшения указанных отклонений используют активные или пассивные системы стабилизации. Среди пассивных систем стабилизации, на КА и ИСЗ стабилизируемых вращением, широкое применение нашли пассивные демпферы угла нутации [1–3].

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

В связи с научно-техническим прогрессом в космической отрасли, в последнее время прослеживается тенденция уменьшения размеров и массы КА и ИСЗ. В соответствии с общепринятой классификацией [4, 5], КА и ИСЗ, масса которых составляет 0,1–500 кг, называются малыми. Обзор публикаций [6–9] показывает, что количество малых КА и ИСЗ постоянно возрастает. В связи с этим, как было указано в работах [10, 11], использование дорогостоящих, сложных и громоздких активных систем стабилизации на малых КА и ИСЗ, является не всегда оправданным и целесообразным решением. Поэтому наиболее приемлемым является вариант использования пассивных систем стабили-