

DOI 10.22363/1815-5235-2022-18-1-11-21  
УДК 624.075

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH ARTICLE

## Определение параметров живучести железобетонной пространственной рамы, работающей в условиях сложного напряженного состояния

О.Е. Осовских , Е.В. Осовских , В.И. Травуш *Юго-Западный государственный университет, Курск, Российская Федерация*  
✉ olga.-osa@mail.ru

### История статьи

Поступила в редакцию: 22 декабря 2021 г.  
Доработана: 12 февраля 2022 г.  
Принята к публикации: 25 февраля 2022 г.

### Для цитирования

*Осовских О.Е., Осовских Е.В., Травуш В.И.* Определение параметров живучести железобетонной пространственной рамы, работающей в условиях сложного напряженного состояния // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2022. Т. 18. № 1. С. 11–21. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-1-11-21>

**Аннотация.** Регламентируемый нормами расчет на устойчивость против прогрессирующего обрушения в динамической постановке содержит общие рекомендации о возможности учета податливости основания и включения в расчетную модель несущих элементов без определения границ их применимости. Приведено сопоставление результатов экспериментальных исследований и численного анализа железобетонной опытной конструкции пространственной рамы – фрагмента каркаса многоэтажного здания в предельных и запредельных состояниях. Установлены особенности деформирования конструктивной системы до и после запроектного воздействия, вызывающего ее внезапную структурную перестройку. Численные исследования выполнены с учетом и без учета податливости основания, а также включения или не включения в расчет несущих элементов. Получено удовлетворительное совпадение данных экспериментальных исследований с результатами динамического расчета. В качестве одного из вариантов расчетной модели принята модифицированная схема, составной частью которой являются элементы расчетной модели второго уровня – фрагмент рамы, смоделированный объемными и плоскими конечными элементами. Установлено, что результаты динамического расчета опытного фрагмента согласуются с опытными данными только при учете элементов нагрузочного устройства и реальных граничных условий, включая деформируемое основание.

**Ключевые слова:** железобетон, пространственная рама, составное сечение, деформации, трещинообразование, параметры живучести, динамический расчет

*Осовских Ольга Евгеньевна*, аспирант, кафедра уникальных зданий и сооружений, Юго-Западный государственный университет, Российская Федерация, 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94; ORCID: 0000-0003-0764-2359, eLIBRARY SPIN-код: 4826-0597; olga.-osa@mail.ru

*Осовских Евгений Васильевич*, кандидат технических наук, доцент кафедры уникальных зданий и сооружений, Юго-Западный государственный университет, Российская Федерация, 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94; ORCID: 0000-0001-6308-0085, eLIBRARY SPIN-код: 8864-7465; jane\_wasp@mail.ru

*Травуш Владимир Ильич*, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры уникальных зданий и сооружений, Юго-Западный государственный университет, Российская Федерация, 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94; ORCID: 0000-0003-1991-7233, eLIBRARY SPIN-код: 6462-2331; travush@mail.ru

© Осовских О.Е., Осовских Е.В., Травуш В.И., 2022

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License  
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

# Determination of the survivability parameters of a reinforced concrete spatial frame operating under conditions of a complex stress state

Olga E. Osovskikh , Evgeny V. Osovskikh , Vladimir I. Travush 

Southwest State University, Kursk, Russian Federation

✉ olga.-osa@mail.ru

## Article history

Received: December 22, 2021

Revised: February 12, 2022

Accepted: February 25, 2022

## For citation

Osovskikh O.E., Osovskikh E.V., Travush V.I. Determination of the survivability parameters of a reinforced concrete spatial frame operating under conditions of a complex stress state. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2022;18(1): 11–21. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-1-11-21>

**Abstract.** The calculation for stability against progressive collapse in a dynamic setting, regulated by the norms, contains general recommendations on the possibility of taking into account a pliable foundation and including non-load-bearing elements in the calculation model without determining the limits of their applicability. The results of experimental studies and numerical analysis of a reinforced concrete experimental design of a spatial frame – a fragment of the frame of a multi-storey building in limiting and transcendental states are compared. The features of deformation of the structural system before and after the beyond-design impact, which causes its sudden structural restructuring, are established. Numerical studies were performed with and without considering the pliable foundation, as well as including or not including non-load-bearing elements in the calculation. Satisfactory agreement between the data of experimental studies and the results of dynamic calculation has been obtained. As one of the variants of the calculation model, a modified scheme was adopted, the constituent part of which are the elements of the calculation model of the second level – a fragment of the frame, modeled by volumetric and flat finite elements. It has been established that the results of the dynamic calculation of the experimental fragment are consistent with the experimental data only when taking into account the elements of the load device and real boundary conditions, including the deformable base.

**Keywords:** reinforced concrete, spatial frame, composite section, deformations, cracking, survivability parameters, dynamic calculation

## Введение

В соответствии с требованиями федерального закона<sup>1</sup> и положениями свода правил<sup>2</sup> должна производиться расчетная проверка зданий и сооружений на устойчивость против прогрессирующего обрушения вследствие предполагаемого начального разрушения, приводящего к изменению конструктивной системы. Такой расчет по особому предельному состоянию, связанному с внезапным удалением одного из несущих элементов, следует выполнять квазистатическим или динамическим методом по пространственным расчетным схемам.

Расчет квазистатическим методом является продолжением проектного расчета и, как правило, использует уже разработанную на стадии проектирования расчетную схему здания. Для этого в первичной расчетной схеме формируется особая комбинация нагрузок<sup>3</sup>, вычисляется реакция в удаляемой связи, которая затем и учитывается во вторичной расчетной схеме с удаленным элементом как дополнительная нагрузка, взятая с обратным знаком. В силу относительной простоты метод пользуется популярностью, однако корректный результат можно получить только в тех случаях, когда форма движения системы в

*Olga E. Osovskikh*, postgraduate student, Department of Unique Buildings and Structures, Southwest State University, 94 50 Let Oktyabrya St, Kursk, 305040, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-0764-2359, eLIBRARY SPIN-code: 4826-0597; olga.-osa@mail.ru

*Evgeny V. Osovskikh*, Candidate of Technical Sciences, Docent of the Department of Unique Buildings and Structures, Southwest State University, 94 50 Let Oktyabrya St, Kursk, 305040, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-6308-0085, eLIBRARY SPIN-code: 8864-7465; jane\_wasp@mail.ru

*Vladimir I. Travush*, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Unique Buildings and Structures, Southwest State University, 94 50 Let Oktyabrya St, Kursk, 305040, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-1991-7233, eLIBRARY SPIN-code: 6462-2331; travush@mail.ru

<sup>1</sup> Федеральный закон № 384 «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений». М., 2010.

<sup>2</sup> СП 385.1325800.2018. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения (с Изменением № 1) М.: Минстрой России, 2019.

<sup>3</sup> СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85\* (с Изменениями № 1, 2). Свод правил от 3 декабря 2016 г. М., 2017; СП 296.1325800.2017. Здания и сооружения. Особые воздействия (с Изменением № 1). М., 2018.

результате запроектного воздействия будет близка к форме ее статического равновесия без удаленного элемента. По этой причине в общем случае необходимо проверить динамическое поведение системы.

Расчет в динамической постановке более сложен, в то же время требования свода правил<sup>4</sup> и пояснения методических рекомендаций [1] носят достаточно общий характер и одновременно предполагают высокую квалификацию исполнителей расчета. При этом ряд рекомендаций относительно учета или возможности неучета податливости основания, желательности дополнительного включения в схему несущих элементов, назначения параметров демпфирования, назначения в расчете времени иницирующего воздействия и некоторые другие непосредственным образом влияют на результаты расчета и должны быть конкретизированы.

Требования к выполнению подобных расчетов есть и за рубежом. Так, следует отметить действующий с 2009 г. документ<sup>5</sup>, содержащий указания по выполнению подобных расчетов квазистатическим или динамическим методом. Расчет предполагает применение упрощенной пространственной схемы с использованием коэффициентов динамичности. Расчетные формулы выведены эмпирически А. Маккеем, К. Маршаном и Д. Стивенсом [2; 3]. Позднее они были уточнены в работах М. Лю [4], М. Цая [5; 6], Х. Саффари и Дж. Машхади [7] и др. Предлагаемые в указанных нормах методы расчета не содержат обязательного требования включать в расчетную модель второстепенные элементы, а конструкции с дополнительными раскосами, связями, аутригерами и т. п. не рассматриваются. В [8; 9] отмечено, что квазистатический анализ не обеспечивает достаточную точность, а иногда даже не гарантирует консервативного решения. Поэтому нелинейный динамический анализ остается очень важной задачей, которая изучается многими исследователями [10–14].

Малое количество верифицированных тестовых примеров при многообразии реальных объектов, подлежащих обязательной расчетной проверке, обуславливает необходимость проведения дополнительных экспериментально-теоретических исследований для оценки воздействия различных параметров, влияющих на результаты расчетов и рекомендаций по их выполнению.

### Экспериментальные исследования

В развитие исследований [15] в испытательной лаборатории Юго-Западный государственный университет разработан и испытан опытный образец фрагмента пространственной железобетонной рамы, работающей в условиях сложного напряженного состояния [16]. Цель исследований – изучение особенностей деформирования, трещинообразования и разрушения элементов конструктивной системы при их сложном сопротивлении в запредельных состояниях, вызванных внезапным выключением вертикального несущего элемента (стойки).

Пространственная рама образована двумя перпендикулярно расположенными плоскими рамами А и Б с пролетами 240 и 180 см соответственно, пересекающимися по вертикальным осям симметрии. Ригели меньшего пролета сплошного сечения выполнены из бетона В35, размер – 14×6 см, ригели большего пролета составного сечения – из бетона В25/В35 с таким же размером, армирование выполнено пространственными каркасами из арматуры класса А240 диаметром 6 мм. В месте пересечения ригелей установлена специально сконструированная вертикальная опора (стойка), оснащенная электронным динамометром для контроля опорной реакции. Конструкция стойки в процессе испытаний может быть медленно или внезапно выведена (удалена) в заданный момент времени.

Испытания на первом этапе проведены в стадии до образования трещин по разным схемам нагружения с медленным и внезапным удалением опоры, а затем, на втором этапе, по одной из этих схем до разрушения вследствие внезапного удаления опоры при действии полной эксплуатационной нагрузки и при наличии трещин.

Схема испытательной установки, размещение механических, электромеханических приборов и тензорезисторов приведены на рис. 1. Для фиксации быстропротекающих процессов часть тензорезисторов, установленных на арматурных стержнях, была подключена к многоканальному анализатору спектра ZET 017-T8. Амплитудное значение вертикального перемещения центральной точки рамы в процессе внезапного удаления опоры дополнительно фиксировалось механическим штангенциркулем.

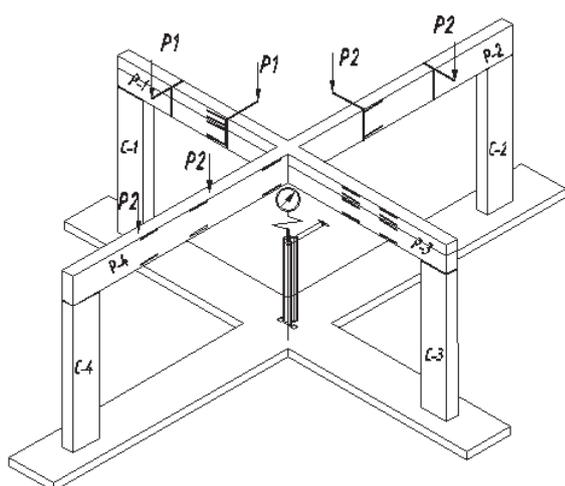
В результате проведенных экспериментальных исследований получены новые данные о напряженно-деформированном состоянии до и после перестройки системы, определены время динамического воздействия от удаления связи до достижения амплитудного значения усилий и перемещений, деформации в характерных сечениях, периоды колебаний и параметры их затухания для различных схем нагружения.

<sup>4</sup> СП 385.1325800.2018. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения (с Изменением № 1) М.: Минстрой России, 2019.

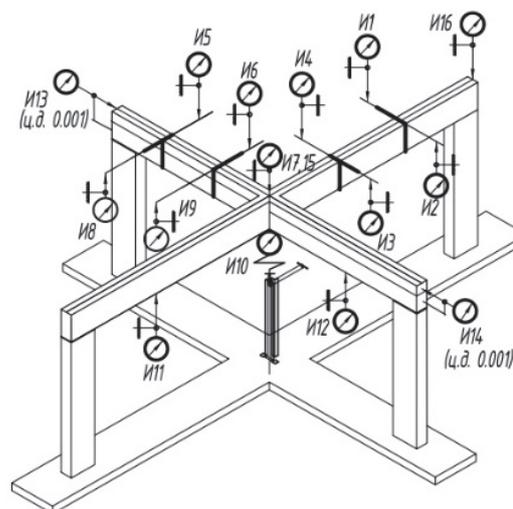
<sup>5</sup> UFC 4-023-03. Design of buildings to resist progressive collapse with change 1/2009.



*a*



*б*



*в*

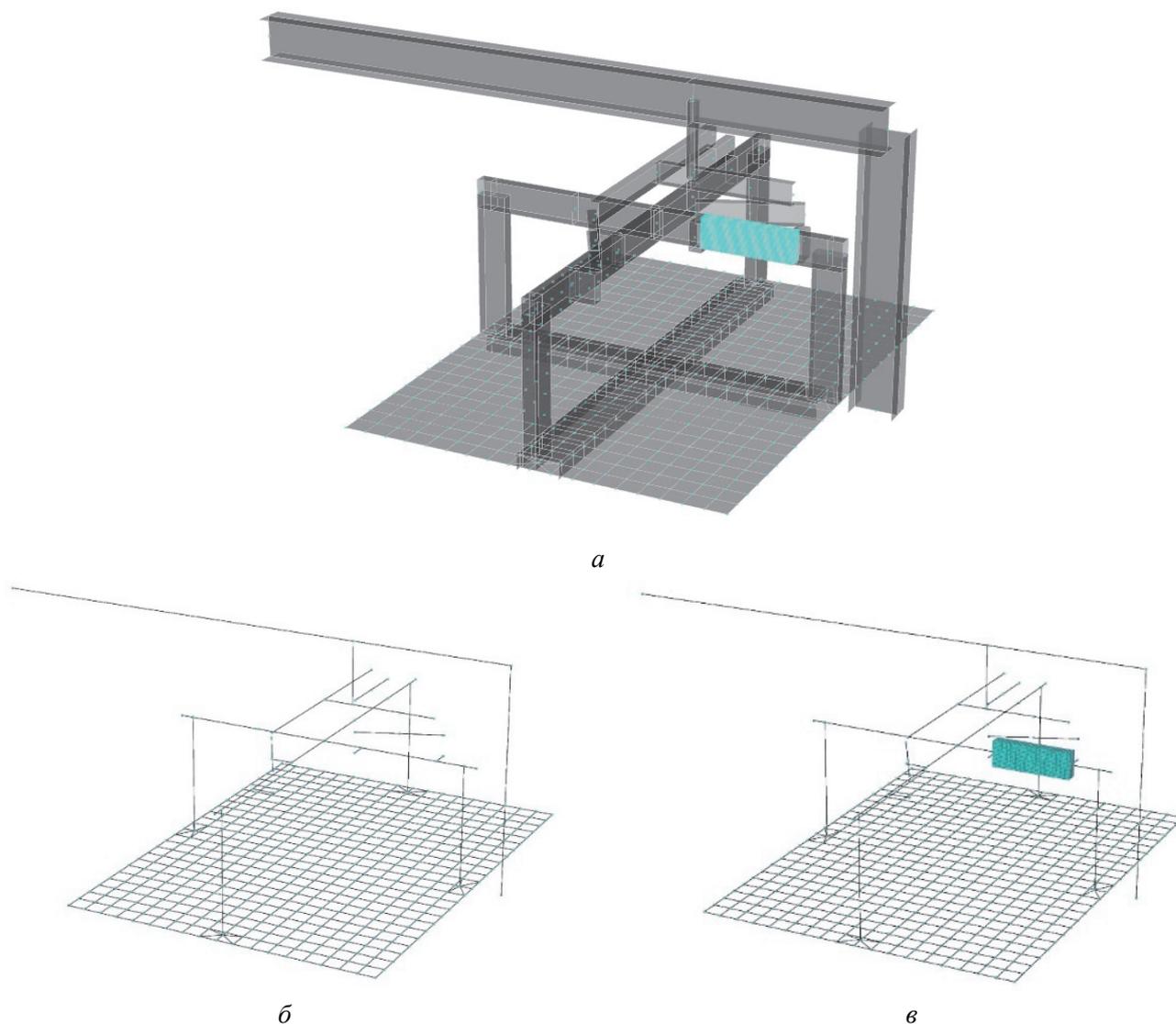
**Рис. 1.** Схема испытаний рамы:  
*a* – нагрузочное устройство; *б* – тензорезисторы; *в* – механические приборы

**Figure 1.** Frame test scheme:  
*a* – load device; *б* – strain gauges; *в* – mechanical devices

### Численные исследования

Как показано в [9; 17], в общем случае расчетные модели статического и динамического расчета одной и той же конструкции могут существенно отличаться. В связи с этим в расчетах были учтены характерные особенности рассчитываемого фрагмента – наличие несущих конструкций нагрузочного устройства и податливого основания. Вторичная расчетная модель с удаленной центральной стойкой показана на рис. 2, *a* и включает деформируемое основание (пол), стальную опорную раму, нагрузочное устройство и рассчитываемую конструкцию.

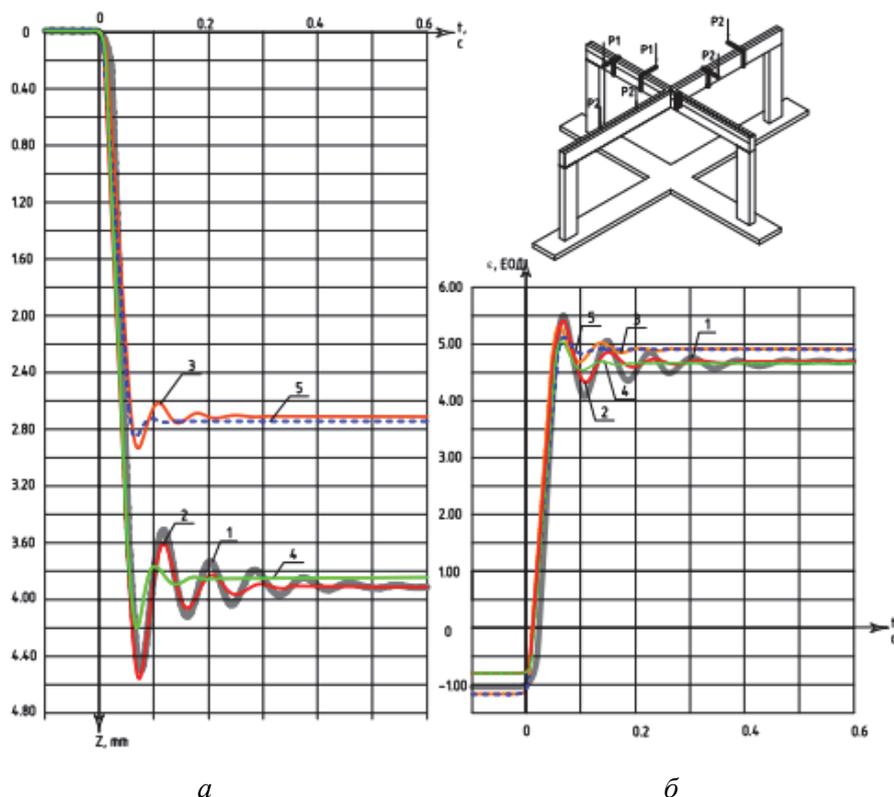
В процессе выполнения статических и динамических расчетов варьировали наличие/отсутствие части элементов нагрузочного устройства, а также характеристики деформируемого основания. Так, взамен отброшенной части нагрузочного устройства учитывалась передаваемая от них реакция в виде сосредоточенных сил, а на узлы деформируемого основания накладывались вертикальные связи.



**Рис. 2.** Вторичная расчетная модель рамы:  
*a* – общий вид; *б* – простая схема; *в* – модифицированная схема  
**Figure 2.** Secondary calculation model of the frame:  
*a* – general view; *б* – simple scheme; *в* – modified scheme

Динамический расчет рассматриваемой конструктивной системы выполнен в режиме прямого интегрирования уравнений движения по методике, приведенной в методическом пособии<sup>6</sup> и в [9; 17]. Вначале по первичной расчетной схеме, включающей центральную стойку и заданные нагрузки особого предельного состояния, было вычислено усилие от статически приложенной нагрузки в удаляемом элементе. Далее, во вторичной схеме с удаленным элементом сформировано три нагружения. Первое нагружение включало заданные внешние нагрузки и вычисленную реакцию удаленного элемента (с обратным знаком) так, что система находилась в состоянии равновесия. Второе нагружение включало одну силу, численно равную реакции в удаленной связи. Третье – динамическое – нагружение определяло параметры численного интегрирования уравнений движения системы. Расчетная процедура описывала поведение конструкции в течение 4 с с интервалами по 0,01 с. За первые 0,1 с прикладывалась эксплуатационная нагрузка вместе с вычисленной реакцией удаленной опоры. После стабилизации системы на отметке 2,00 с в течение 0,06 с реакция удаленной связи компенсировалась силой из второго нагружения, что эквивалентно удалению связи за указанные 0,06 с. Результаты расчетов в сопоставлении с опытными данными приведены на рис. 3, начало шкалы времени перенесено на момент выключения связи.

<sup>6</sup> UFC 4-023-03. Design of buildings to resist progressive collapse with change 1/2009.



**Рис. 3.** Результаты численных и экспериментальных исследований опытного фрагмента:  
*a* – вертикальные перемещения центральной точки; *б* – относительные деформации в отмеченном сечении; 1 – опытное значение;  
 2 – расчет с учетом всех параметров; 3 – то же, с нагрузочным устройством и жестким основанием;  
 4 – то же, без нагрузочного устройства и с податливым основанием; 5 – то же, без нагрузочного устройства и на жестком основании

**Figure 3.** Results of numerical and experimental studies of the experimental fragment:  
*a* – vertical displacements of the central point; *б* – relative deformations in the marked section; 1 – experimental value;  
 2 – calculation taking into account all parameters; 3 – the same, with a load device and a rigid base;  
 4 – the same, without a load device and with a pliable base; 5 – the same, without a load device and on a rigid base

### Результаты и обсуждение

Анализ полученных материалов исследований позволяет отметить следующее.

Результаты статических расчетов несколько различаются только при варьировании податливости основания, что объясняется перераспределением усилий между элементами статически неопределимой системы, при этом реакция в удаляемой опоре не меняется.

Результаты динамических расчетов (рис. 3) заметно различаются по всем рассмотренным случаям. Перемещения и относительные деформации, полученные с учетом влияния нагрузочного устройства и податливости основания (кривая 2) хорошо согласуются с опытными данными (кривая 1) в части периодов колебаний, а также амплитудных и установившихся значений величин. Неучет податливости основания (кривая 3) снижает амплитудные значения расчетных величин по отношению к установившимся значениям и сокращает период колебаний. Тот же эффект, но выраженный в большей степени (кривая 4) наблюдается при замене нагрузочного устройства передаваемыми от него реактивными силами. Наконец, неучет наличия и нагрузочного устройства, и податливости основания (кривая 5) в 1,5 раза занижает периоды колебаний и амплитудные значения расчетных величин. В схемах без нагрузочного устройства (кривые 4 и 5) амплитудные значения достигались раньше по времени и быстрее затухали. Подробные данные приведены в табл. 1.

В [16; 18] предлагается для детального исследования НДС отдельных элементов использовать двухуровневую расчетную схему, когда из общего расчета может быть выделен малый фрагмент для более подробного анализа с учетом усилий, действующих на этот элемент со стороны отброшенных конструкций. Усилия при этом принимаются по результатам статического или динамического расчета для фиксированного набора усилий.

Таблица 1

## Сопоставление опытных данных и результатов численных исследований

№ п/п	Приращение деформаций, ЕОД			Перемещения, мм			Период, с
	$\Delta \epsilon_{\max}$	$\Delta \epsilon$	$\frac{\Delta \epsilon_{\max}}{\Delta \epsilon}$	$\Delta z_{\max}$	$\Delta z$	$\frac{\Delta z_{\max}}{\Delta z}$	
1	6,6	5,75	1,15	4,5	3,95	1,16	0,09
2	6,3	5,55	1,13	4,55	3,95	1,15	0,10
3	6,5	6,07	1,07	2,90	2,70	1,07	0,08
4	5,75	5,40	1,06	4,20	3,85	1,09	0,07
5	6,30	6,20	1,03	2,85	2,70	1,05	0,06

Table 1

## Comparison of experimental data and results of numerical studies

No	Increment deformations, $\times 10^{-5}$			Movements, mm			Period, sec
	$\Delta \epsilon_{\max}$	$\Delta \epsilon$	$\frac{\Delta \epsilon_{\max}}{\Delta \epsilon}$	$\Delta z_{\max}$	$\Delta z$	$\frac{\Delta z_{\max}}{\Delta z}$	
1	6.6	5.75	1.15	4.5	3.95	1.16	0.09
2	6.3	5.55	1.13	4.55	3.95	1.15	0.10
3	6.5	6.07	1.07	2.90	2.70	1.07	0.08
4	5.75	5.40	1.06	4.20	3.85	1.09	0.07
5	6.30	6.20	1.03	2.85	2.70	1.05	0.06

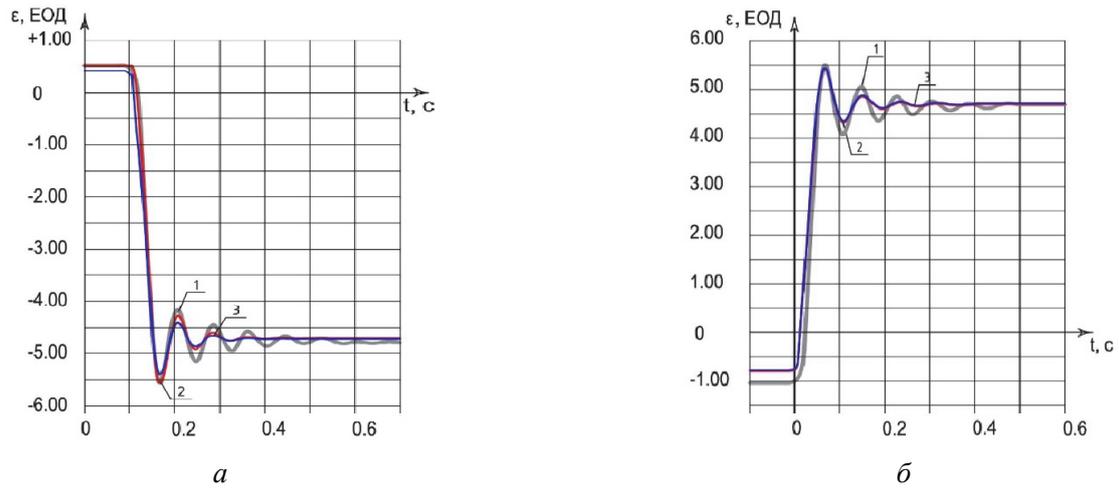
В развитие указанного алгоритма предлагаются модифицированная первичная, а затем и вторичная расчетная модель, в которой часть стержневых элементов в зоне, подлежащей детальному анализу, заменяется специально разработанной объемной моделью с контактными пластинами на месте соединения объемного тела с пространственной стержневой моделью. Такой расчетный прием в ряде случаев позволяет для получения интересующих результатов избежать необходимости переноса разрозненных данных НДС системы из схемы первого уровня в схему второго уровня.

Статический и динамический расчет опытного фрагмента (рис. 2, а) выполнен с использованием простой (б) и модифицированной (в) вторичной расчетной схемы с учетом наличия нагрузочного устройства и деформируемого основания, в которой объемными элементами смоделирован участок сплошного ригеля, работающий на кручение с изгибом. Результаты расчета по обеим схемам согласуются между собой и с опытными данными<sup>7</sup>.

Расчетные сечения 1 и 2 выбраны на сплошном ригеле в местах наклейки датчиков: 1 – в точке пересечения ригелей, 2 – на участке кручения с изгибом. На рис. 4 показаны относительные деформации на уровне арматурных стержней в сечении 1 для нагрузки 1,84 кН (собственный вес рамы + вес рычага без корзины) по исходной стержневой схеме (а) и по стержневой схеме (б), модифицированной объемными элементами. Расчетный период колебаний по обеим схемам после удаления связи составил 0,086 с (опытное значение – 0,09 с).

Объемными элементами могут быть заменены те части стержневой расчетной модели, которые требуют углубленного анализа. В качестве примера рассмотрена пространственная рама, образованная железобетонными колоннами 300×300 мм, ригелями 300×500 мм и сборными перекрытиями размером 200 мм (условно не показаны), класс бетона В30. Заданная нагрузка в целом соответствует уровню эксплуатационных нагрузок для зданий рассматриваемого типа. Моделирование выполнено в двух вариантах: как пространственная пластинчато-стержневая конструкция (рис. 5, а) и как та же конструкция, модифицированная вставкой из объемных элементов (рис. 5, б). На границах стержневых и объемных элементов предусмотрены переходные элементы-пластины (рис. 5, в). Для особой комбинации нагрузок определены формы и вычислены периоды собственных колебаний. В частности, для 10-й формы колебаний, сходной с деформированной схемой рамы с удаленным вертикальным элементом, получен период колебаний 0,145 с, время выключения опоры принимаем равным 0,015 с.

<sup>7</sup> Осовских О.Е. Программа для обработки тензометрических данных динамических испытаний. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2021616294, 20.04.2021. Заявка № 2021615148 от 13.04.2021 г.



**Рис. 4.** Результаты численных и экспериментальных исследований опытного фрагмента с использованием простой и модифицированной расчетной схемы:

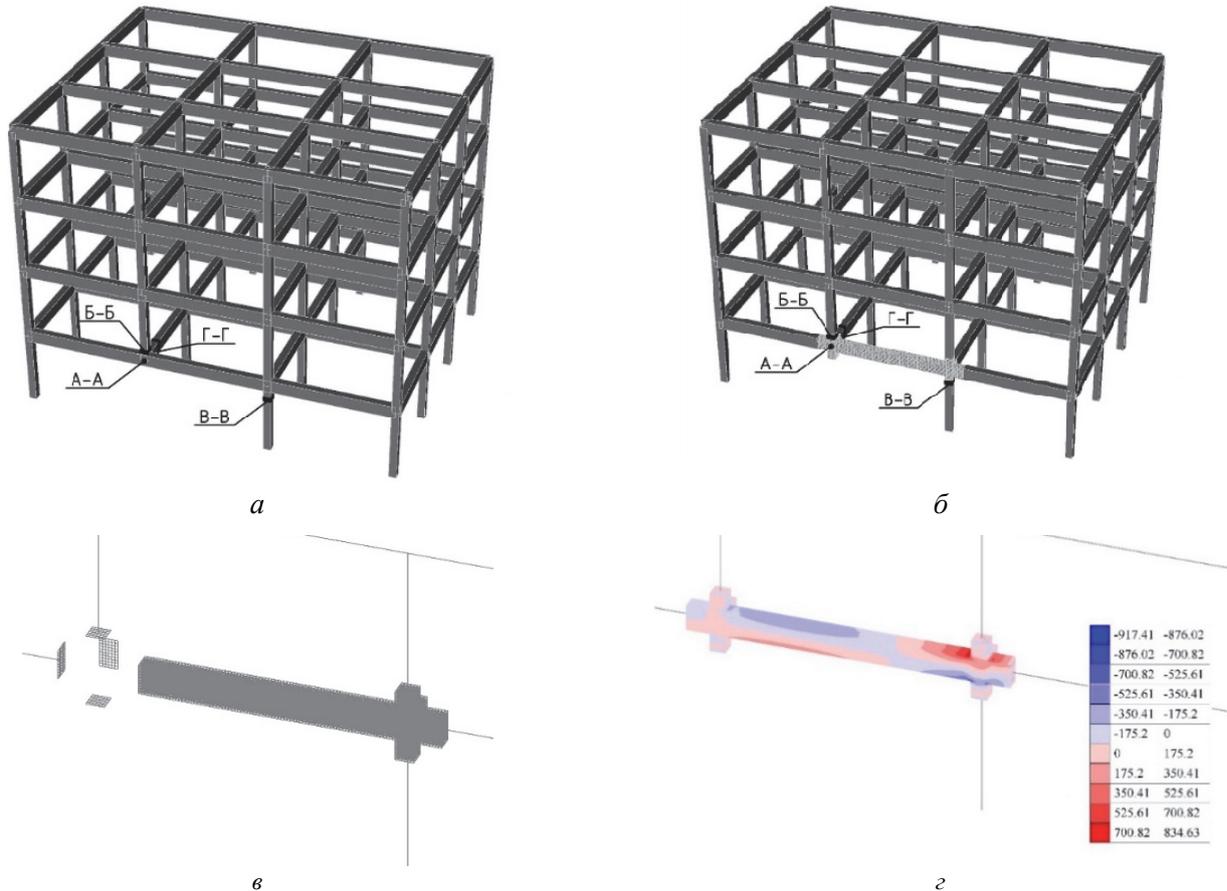
*a* – относительные деформации в сечении 1; *б* – то же, в сечении 2;

1 – опытное значение; 2 – расчет по простой схеме; 3 – то же, по модифицированной схеме

**Figure 4.** Results of numerical and experimental studies of the experimental fragment using a simple and modified calculation scheme:

*a* – relative deformations in section 1; *б* – the same, in section 2;

1 – experimental value; 2 – calculation according to a simple scheme; 3 – the same, according to a modified scheme



**Рис. 5.** Расчетная модель многоэтажной рамы:

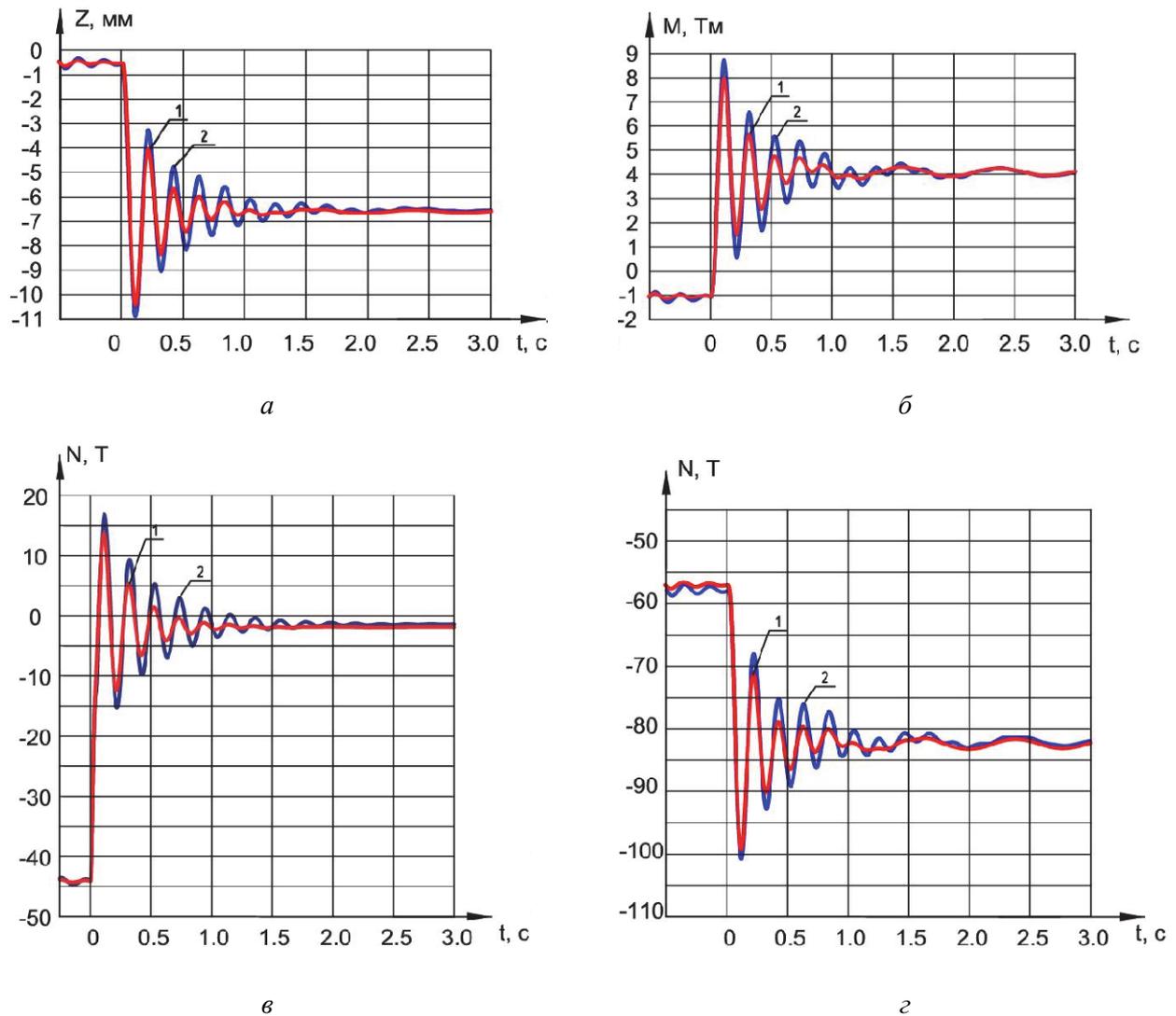
*a* – стержневая вторичная схема; *б* – модифицированная вторичная схема;

*в* – схема моделирования фрагмента рамы объемными элементами; *г* – нормальные напряжения  $S_x$  в объемных элементах

**Figure 5.** Calculation model of a multi-storey frame:

*a* – rod secondary scheme; *б* – modified secondary scheme;

*в* – scheme for modeling a frame fragment by volumetric elements; *г* – normal stresses  $S_x$  in volumetric elements



**Рис. 6.** Результаты численных исследований опытного фрагмента:  
 а – вертикальные перемещения над удаленной опорой в сечении А–А; б – изгибающий момент в сечении Б–Б;  
 в – продольная сила в сечении В–В; г – продольная сила в сечении Г–Г; 1 – простая стержневая модель; 2 – модифицированная модель

**Figure 6.** Results of numerical studies of the experimental fragment:  
 а – vertical displacements over the remote support in section А–А; б – bending moment in section Б–Б;  
 в – longitudinal force in the section В–В; г – longitudinal force in the section Г–Г; 1 – simple rod model; 2 – modified model

Таблица 2

**Сопоставление результатов численных исследований стержневой и модифицированной моделей здания**

Параметр	Сечение	$\Delta_{\max}$	$\Delta$	$\Delta_{\max}/\Delta$	%	Период, с
Z, мм	А–А	9,58	5,98	1,60	-7,5	0,21
		10,30	5,94	1,73	–	0,21
M, Тм	А–А	9,16	5,18	1,77	-4,3	0,21
		9,27	5,20	1,85	–	0,21
N, Т	В–В	60,66	42,00	1,44	-6,7	0,21
		56,58	41,87	1,35	–	0,21
N, Т	Г–Г	41,97	23,08	1,82	-7,1	0,21
		39,32	23,08	1,70	–	0,21

Примечание. Числитель – модифицированная стержневая модель, знаменатель – простая стержневая модель.

Comparison of the results of numerical studies of the rod and modified building models

Parameter	Cross section	$\Delta_{max}$	$\Delta$	$\Delta_{max}/\Delta$	%	Period, sec
Z, mm	A–A	9.58	5.98	1.60	–7.5	0.21
		10.30	5.94	1.73	–	0.21
M, Tm	A–A	9.16	5.18	1.77	–4.3	0.21
		9.27	5.20	1.85	–	0.21
N, T	B–B	60.66	42.00	1.44	–6.7	0.21
		56.58	41.87	1.35	–	0.21
N, T	Г–Г	41.97	23.08	1.82	–7.1	0.21
		39.32	23.08	1.70	–	0.21

Note. Numerator – modified rod model, denominator – simple rod model.

На рис. 6 и в табл. 2 приведены результаты расчета по простой и модифицированной расчетным моделям. Получено полное качественное соответствие прогибов ( $a$ ), продольных сил ( $\sigma$ ,  $\varepsilon$ ) и изгибающих моментов ( $\sigma$ ) в расчетных сечениях, при этом амплитудные значения названных величин для модифицированной модели на 4,3–7,5 % превышают соответствующие значения для простой стержневой модели, что оставляет поле для продолжения исследований.

### Заключение

Проведены экспериментальные исследования и получены опытные значения параметров живучести (НДС, периоды колебаний, параметры демпфирования) фрагмента железобетонной рамы в упругой стадии (до образования трещин) и в упругопластической стадии работы конструкции (эксплуатационная нагрузка) при внезапном выключении центральной стойки.

Выполнено сопоставление результатов численных исследований с опытными данными о времени от момента выключения несущего элемента рамы (стойки) до достижения амплитудных значений параметров, изменений во времени частот и форм колебаний характерных сечений, амплитудных значений перемещений центральной точки рамы при внезапном выключении центральной стойки.

Установлено, что результаты динамического расчета опытного фрагмента согласуются с опытными данными только при учете элементов нагрузочного устройства и реальных граничных условий, включая деформируемое основание.

Предложен алгоритм построения разноуровневых схем при решении задач проектирования железобетонных каркасов жилых, гражданских и производственных зданий.

### Список литературы / References

1. Kolchunov V.I., Emelyanov S.G., Kolchunov V.I., Savin S.Yu., Fedorova N.V., Travush V.I., Kelasev N.G., Kodys E.N., Trekin N.N., Shapiro G.I., Novikova M.Yu., Shapiro A.G., Belostotskii A.M., Pavlov A.S., Korenkov P.A. Design of measures to protect buildings and structures from progressive collapse: guidance manual. Moscow; 2018.

Колчунов В.И., Емельянов С.Г., Колчунов В.И., Савин С.Ю., Федорова Н.В., Травуш В.И., Келасьев Н.Г., Кодыш Э.Н., Трекин Н.Н., Шапиро Г.И., Новикова М.Ю., Шапиро А.Г., Белостоцкий А.М., Павлов А.С., Кореньков П.А. Проектирование мероприятий по защите зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения: методическое пособие. М., 2018.

2. Marchand K., McKay A., Stevens D. *Development and application of linear and nonlinear static approaches in UFC 4-023-03*. Structures Congress, Austin, Texas, April 30 – May 2, 2009. Austin; 2009.

3. McKay A. *Alternate path method in progressive collapse analysis: variation of dynamic and non-linear load increase factors: thesis presented to the graduate faculty of The University of Texas at San Antonio*. San Antonio; 2008.

4. Li Y., Lu X., Guan H., Ye L. An energy-based assessment on dynamic amplification factor for linear static analysis in progressive collapse design of ductile RC frame structures. *Advances in Structural Engineering*. 2014;17(8):1217–1226.

5. Tsai M.H. Assessment of analytical load and dynamic increase factors for progressive collapse analysis of building frames. *Advances in Structural Engineering*. 2012;15(1):41–54.

6. Liu M. A new dynamic increase factor for nonlinear static alternate path analysis of building frames against progressive collapse. *Engineering Structures*. 2013;48:666–673.

7. Saffari H., Mashhadi J. Assessment of dynamic increase factor for progressive collapse analysis of RC structures. *Engineering Failure Analysis*. 2018;84:300–310.
8. Marjanishvili S., Agnew E. Comparison of various procedures for progressive collapse analysis. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2006;20(4):365–374.
9. Perelmutter A.V., Kabantsev O.V. About the problem of analysis resistance bearing systems in failure of a structural element. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2018;14(3):103–113.
10. Fialko S.Yu., Kabantsev O.V., Perelmutter A.V. Elasto-plastic progressive collapse analysis based on the integration of the equations of motion. *Magazine of Civil Engineering*. 2021;2(102):10214.
11. Yu J., Rinder T., Stolz A., Tan K.-H. Dynamic progressive collapse of an RC assemblage induced by contact detonation. *Journal of Structural Engineering*. 2014;140(6):04014014.
12. Pham A., Tan K., Yu J. Numerical investigations on static and dynamic responses of reinforced concrete sub-assemblages under progressive collapse. *Engineering Structures*. 2016;10:1016–1028.
13. Tian L.-M., Wei J.-P., Hao J.-P., Wang X.-T. Dynamic analysis method for the progressive collapse of long-span spatial grid. *Steel and Composite Structures*. 2017;23(4):435–444.
14. Wang T., Zhang L., Zhao H., Chen Q. Analysis on dynamic response of reinforced concrete frame for resisting progressive collapse. *The Open Construction & Building Technology Journal*. 2019;13:27–38.
15. Travush V.I., Fedorova N.V. Survivability of structural systems of buildings with special effects. *Magazine of Civil Engineering*. 2018;5(81):73–80.
16. Osovskikh O.E. Experimental studies of a fragment of a reinforced concrete frame of a multi-storey building under complex stress state. *Construction and Reconstruction*. 2021;5(97):62–73. (In Russ.)  
*Осовских О.Е.* Экспериментальные исследования фрагмента железобетонного каркаса многоэтажного здания при сложном напряженном состоянии // Строительство и реконструкция. 2021. Т. 5. № 97. С. 62–73.
17. Kabantsev O.V., Perelmutter A.V. On the methods of analysis of the resistance of load-bearing systems in failure modes of a structural element. In: Tamrazyan A.G. (ed.) *Loleitovskie Readings – 150. Modern Methods for Calculating Reinforced Concrete and Stone Structures for Limiting States: Collection of Reports of the International Scientific and Practical Conference Dedicated to the 150th Anniversary of the Birth of Professor, Author of the Methodology for Calculating Reinforced Concrete Structures According to the Stage of Destruction, Founder of the Soviet Scientific School of the Theory of Reinforced Concrete, Founder and First Head of the Department of Reinforced Concrete Structures of the Moscow Civil Engineering Institute (MISI) A.F. Loleita*. Moscow: MISI-MGSU Publ.; 2018. p. 132–137. (In Russ.)  
*Кабанцев О.В., Перельмутер А.В.* О методах анализа сопротивления несущих систем в режимах отказа конструктивного элемента // Лолейтовские чтения – 150. Современные методы расчета железобетонных и каменных конструкций по предельным состояниям: сборник докладов Международной научно-практической конференции, посвященной 150-летию со дня рождения профессора, автора методики расчета железобетонных конструкций по стадии разрушения, основоположника советской научной школы теории железобетона, основателя и первого заведующего кафедрой железобетонных конструкций Московского инженерно-строительного института (МИСИ) А.Ф. Лолейта / под ред. А.Г. Тамразяна. М.: Изд-во МИСИ-МГСУ, 2018. С. 132–137.
18. Alkadi S.A., Fedorova N.V., Osovskiyh O.E. Analysis of reinforced concrete space frame deformation with composite sections elements. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018;456:012033. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/456/1/012033>