

Методика обрушения здания элеватора из монолитного железобетона

Юрий Петрович Желуницын, Олег Сергеевич Рахманин,
Мария Сергеевна Гречухина, Александра Владиславовна Куцепалова
Самарский государственный технический университет (СамГТУ); г. Самара, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Демонтаж зданий с помощью энергии взрыва является актуальной проблемой, так как процесс осложнен большим количеством различных геометрических параметров обрушаемых конструкций, которые могут не подходить под существующую методику обрушения, тем самым затрудняя процесс демонтажа. Примером такого объекта обрушения служит элеватор из монолитного железобетона в г. Ярославле. При обрушении здания на свое основание элеватор из-за большой прочности материала постройки не разрушится. Для обрушения конструкции в заданном направлении потребуется изготовить вруб с большим значением высоты и угла, что будет сложной технической проблемой. Предлагается метод, позволяющий уменьшить высоту вруба и объем специальных взрывных работ.

Материалы и методы. Выполнен расчет параметров вруба с учетом приобретаемой зданием в момент взрыва кинетической энергии, создающей дополнительные силы, способствующие его обрушению. Эти силы не учитывались в расчетах по существующей методике. По результатам проведенного расчета объем буровзрывных работ был уменьшен за счет снижения значений угла и высоты вруба, которые составили 21,5° и 3,94 м соответственно. Эти значения в 1,6 раза меньше относительно расчетов, произведенных с помощью существующей методики (угол вруба 32°, высота вруба 6,5 м).

Результаты. Геометрические параметры вруба, рассчитанные по новому методу, использованы при проектировании взрывных работ по сносу четырех силосных корпусов элеватора в Ярославле. По итогам выполнения работ все здания были успешно обрушены, что подтвердило эффективность предложенной методики.

Выводы. Проведенные взрывные работы продемонстрировали высокую эффективность и практическую значимость разработанного метода. Предложенная методика позволяет снизить величину вруба на 40 % по сравнению с существующим методом, что упрощает и ускоряет выполнение специальных взрывных работ, снижая риски для окружающих объектов и повышая безопасность рабочих за счет уменьшения количества взрывчатого вещества.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: реконструкция, обрушение здания, расчет высоты вруба, методы демонтажных работ, закон сохранения энергии, кинетическая энергия, буровзрывные работы, специальные взрывные работы, методика взрывного обрушения, валка взрывом, направленное обрушение

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (тема № 125040404855-0). Авторы выражают благодарность техническому директору ООО «Спецтехвзрыв» С.В. Драчеву за содействие в практической реализации работы; профессору кафедры технологии твердых химических веществ Ю.П. Желуницыну за научное руководство.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Желуницын Ю.П., Рахманин О.С., Гречухина М.С., Куцепалова А.В. Методика обрушения здания элеватора из монолитного железобетона // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 12. С. 1878–1891. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.12.1878-1891

Автор, ответственный за переписку: Александра Владиславовна Куцепалова, al.kutsepalova@mail.ru.

Methodology for the collapse of a monolithic reinforced concrete elevator building

Yurii P. Zhelunitsyn, Oleg S. Rakhmanin, Mariia S. Grechukhina,
Aleksandra V. Kutsepalova

Samara State Technical University; Samara, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Dismantling of buildings using explosive energy is an urgent problem, as the process is complicated by a large number of different geometric parameters of collapsed structures, which may not fit the existing collapse methodology, thus complicating the process of dismantling the building. An example of such a collapse object is a monolithic reinforced concrete elevator in the city of Yaroslavl. If the building collapses on its base, the elevator, due to the great strength of the building material, will not collapse. For the collapse of the structure in a given direction, it will be necessary to make a cutout with a large value of height and angle, which will be a difficult technical problem. The authors propose a method to reduce the height of the cut and the volume of special blasting operations.

Materials and methods. The calculation took into account the kinetic energy acquired by the building at the time of the explosion, which created additional forces contributing to its collapse. These forces were not taken into account in the calculations according to the existing methodology. According to the results of the calculation, the volume of drilling and blasting operations was reduced by reducing the values of the angle and height of the cut, which amounted to 21.5° and 3.94 m, respectively. These values are 1.6 times less compared to the results obtained using the existing methodology, where the height of the cut was 6.5 m at an angle of 32°.

Results. The calculated blast parameters were applied to the design of blasting operations for the demolition of four silo buildings of a grain elevator in Yaroslavl. All buildings were successfully demolished, which confirmed the effectiveness of the proposed methodology.

Conclusions. The blasting operations demonstrated high efficiency and practical significance of the developed method. The proposed method allows to reduce the size of the cut by 40 % compared to the existing method, which simplifies and speeds up the performance of special blasting operations, reducing the risks to surrounding objects and increasing the safety of workers by reducing the number of explosives.

KEYWORDS: reconstruction, building collapse, calculation of the cutting height, methods of dismantling works, law of energy conservation, kinetic energy, drilling and blasting works, special blasting works, methodology of explosive collapse, blast felling, directional collapse

Acknowledgements. This study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under a state assignment (theme No. 125040404855-0). The authors would like to thank S.V. Drachev, Technical Director of Spetstekhvzryv LLC, for his assistance in the practical implementation of the work, and Yu.P. Zhelunitsyn, Professor of the Department of Technology of solid chemicals, for his scientific supervision.

FOR CITATION: Zhelunitsyn Yu.P., Rakhmanin O.S., Grechukhina M.S., Kutsepalova A.V. Methodology for the collapse of a monolithic reinforced concrete elevator building. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(12):1878-1891. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.12.1878-1891 (rus.).

Corresponding author: Alexandra V. Kutsepalova, al.kutsepalova@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Демонтаж представляет собой неотъемлемую часть жизненного цикла строительных объектов. Решение по демонтажу зданий и сооружений может быть обусловлено различными причинами: физическим износом постройки; выявлением конструктивных дефектов, делающих невозможным дальнейшее использование объекта; необходимостью сноса сооружения для возведения на его месте нового здания и др. [1–3].

Одним из наиболее распространенных материалов, применяемых в строительстве, является монолитный железобетон, который вследствие технологических ошибок подвержен таким дефектам, как трещины, что может повлечь аварийные ситуации, приводящие в негодность здание [4, 5]. Выходом из такой ситуации служит ремонт или снос здания.

Способы разрушения зданий и сооружений подразделяются на механический, взрывной, специальный, поэлементный, ручной [6–14]. По виду энергии способы разрушения делятся на механические, термические и взрывные [15]; по приложению сил — на контактные и шпуровые средства [16, 17]. Во всех случаях разрушение заключается в разуплотнении структур, ослаблении внутренних связей в материалах, в дальнейшем нарушении целостности и разделении их на отдельные слабосвязанные (полное разрушение) и несвязанные друг с другом (неполное разрушение) элементы, что зависит от вида внешнего воздействия и совершенства структуры материалов [18]. Взрывное разрушение зданий и сооружений — один из самых эффективных и быстрых способов демонтажа объектов. Главное преимущество взрывного способа обрушения состоит в экономической выгоде, обусловленной меньшими

трудозатратами, и скорости проведения работ [19 22]. Различные методы взрывного разрушения могут быть использованы в зависимости от типа конструкции здания; окружающей среды; от подконтрольного взрыва с минимальным повреждением окружающих объектов до контролируемого падения здания в специально подготовленную зону [23–25].

Существует множество техник и стратегий, которые применяются специалистами в области взрывного демонтажа, начиная со способа моделирования сноса зданий [26–30] и заканчивая использованием различных технологий и предохранительных укрытий [31]. Однако выбор технологии может осложняться особенностью сносимой конструкции. Широко используются новые методы и технологии для обрушения зданий и различных конструкций, например, для снижения трудоемкости и стоимости работ предлагают использовать удлиненные заряды [32] кумулятивного действия, размещая их по контуру здания, также эти заряды применяют для разрушения внутренних металлоконструкций в заданном направлении [33–35]. С целью создания в стенах обрушаемого сооружения дополнительного напряжения используют шпуровые заряды, расположенные между оконными проемами, что повышает вероятность обрушения здания [36]. Для разрушения конструкций коробчатой формы, резервуаров, а также кирпичной кладки, бетона и железобетона, находящихся в земле, применяют гидровзрывной способ, в котором свободное пространство в шпуре заполняют водой или глинистым раствором [37, 38]. Чтобы существенно снизить удельный расход взрывчатого вещества на разрушение по сравнению с взрыванием обычных (открытых) накладных зарядов также используют гидровзрывание, размещая заряд, состоящий из нескольких патронов, в полиэтилено-

вом сосуде с водой, который прикладывается к разрушаемому объекту [39]. Чтобы повысить точность, надежность и безопасность выполнения взрывных работ при обрушении высотных конструкций малого диаметра предлагается использовать взрыв накладного заряда и создание сквозных щелей со стороны валки, которые отделяют от опоры клиновидный фрагмент с последующим его выбиванием в момент взрыва [40]. Для уменьшения величины зарядов взрывчатых веществ и снижения вредного воздействия на расположенные в непосредственной близости здания применяют способ, при котором шпурсы поочередно заполняют расширяющейся при затвердевании бетонной смесью и зарядами взрывчатого вещества, создающими в стенах здания щели, понижая его прочность [41]. Известны методы, предотвращающие загрязнение окружающей среды пылью, выделяемой в воздух вследствие обрушения здания взрывным методом [42]. Причиной такого множества различных подходов к обрушению здания является сложность процесса из-за многообразия форм, размеров, материалов конструкций и технологий строительства.

Классический элеватор представляет собой силосный корпус, состоящий из трех частей: основной части — комплекса силосов или чячек для хранения зерна и двух вспомогательных частей — подсилосной и надсилосной. Силосы могут иметь в сечении разнообразную форму — квадратную, круглую или многоугольную. Диаметр силосов может быть от 5 до 12 м, высота — до 30 м, толщина стен — от 18 до 24 см. Основной материал конструкций зданий — монолитный железобетон. Инженеры-строители изучают его поведение под действием взрыва [43–45], что связано со сложностью механизмов его разрушения и высокой частотой использования при строительстве [46–48]. В представленной работе объектом обрушения выступает здание элеватора из монолитного железобетона, построенное в 1938 г.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Примерная схема расположения силосов элеватора представлена на рис. 1.

При взрывном демонтаже здания его обрушают в заданном направлении с помощью вруба или на свое основание [17]. Здания без высокопрочных несущих элементов, имеющие большую площадь сечения, обрушают на свое основание [49–60]. Высотные конструкции с небольшой площадью основания (башни, дымовые трубы и т.д.) обрушают в заданном направлении. Элеватор из монолитного железобетона, имеющий большую площадь опоры и построенный из прочного материала (рис. 2), в полной мере не соответствует ни одному из этих типов обрушения. При обрушении на свое основание здание не разрушится из-за высокой прочности монолитного железобетона и большой площади опоры, при кото-

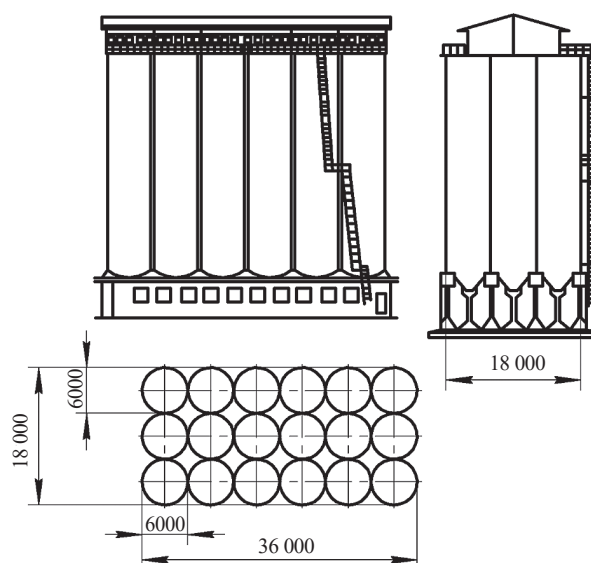


Рис. 1. Схема расположения силосов из монолитного железобетона

Fig. 1. Layout of monolithic reinforced concrete silos

рой удельное давление от массы оседающей части здания не превысит предел прочности железобетона на сжатие. В связи с этим необходимо осуществлять обрушение элеватора в заданном направлении. Принцип направленного обрушения сооружений заключается в образовании сквозного подбоя (вруба) в несущих опорах со стороны направления валки при сохранении опоры (целика) с противоположной стороны. В результате создания опрокидывающего момента обеспечивается падение сооружения в заданном направлении. При таком способе обрушения проблемой является недостаточная высота и большая площадь основания здания. Для обрушения такого здания элеватора из монолитного железобетона в заданном направлении необходимо будет изготовить вруб с большими геометрическими параметрами, что сложно осуществить технически.

Здание элеватора в г. Ярославле представляет собой силосный корпус, в составе конструкции которого расположено 15 силосов в 3 ряда по 5 силосов. Силосы расположены на монолитной железобетонной опорной плите, которая опирается на фундаментную стену и 23 железобетонные колонны высотой 3 м, находящиеся в подсилосной части. Опорная плита возвышается над поверхностью земли на 1,3 м. Фотография одного из четырех силосных корпусов представлена на рис. 2, геометрические параметры указаны в табл. 1.

При проектировании и расчете условий обрушения корпуса элеватора в качестве целика был принят один ряд силосов со стороны, противоположной направлению падения, в двух других рядах находился вруб в направлении падения здания.

Валка взрывным способом здания элеватора выполняется осаждением на свое основание под углом. Угол наклона служит для уменьшения обще-



Рис. 2. Элеватор из монолитного железобетона в г. Ярославле

Fig. 2. Elevator of monolithic reinforced concrete in Yaroslavl

Табл. 1. Геометрические параметры здания элеватора

Table 1. Geometrical parameters of the elevator building

Элемент конструкции Construction element	Размер, м Size, m
Длина опорной плиты здания Length of the building baseplate	25,4
Ширина опорной плиты здания Width of the building base plate	15,4
Толщина опорной плиты Thickness of base plate	0,4
Наружный диаметр цилиндрических емкостей Outside diameter of cylindrical vessels	5
Толщина цилиндрических емкостей Thickness of cylindrical vessels	0,18
Высота цилиндрических емкостей Height of cylindrical vessels	30
Длина фундамента Foundation length	25
Ширина фундамента Foundation width	15
Толщина стен фундамента Foundation wall thickness	0,54
Размеры колонн Column dimensions	0,8 × 0,8

го усилия разрушения здания. В этом случае возникающее усилие раскладывается на нормальное и касательное напряжение, что приводит к увеличению касательного напряжения и способствует облегчению излома конструкции здания.

В ходе проведения исследований определена возможность раздавливания массой здания целика в первоначальный момент после взрыва зарядов подбоя:

$$\sigma_d > \sigma_{сж}, \quad (1)$$

где σ_d — допустимое напряжение при одноосном сжатии бетона, для марки М400 составляет 210 кг/см²; $\sigma_{сж}$ — напряжение сжатия в целике в момент образования вруба, когда все давление массы элеватора передается на целик:

$$\sigma_{сж} = \frac{P}{S_{ц}}, \quad (2)$$

где $P = 3\,065\,000$ — масса обрушаемой конструкции, кг; $S_{ц}$ — площадь целика, см². Площадь целика принимается как сумма площадей сечения заднего ряда цилиндрических емкостей (5 шт.): $S_{ц} = 5(r^2) = 136\,200$ см².

Тогда:

$$\sigma_{сж} = 22,50 \text{ кг/см}^2.$$

Исходя из того, что полученное значение на порядок меньше допустимого напряжения (1), раздавливание целика не произойдет, направленность валки здания элеватора обеспечивается.

Величина угла и высоты вруба, рассчитанная по методике из РТМ 36.9–88 «Руководство по проектированию и производству взрывных работ при реконструкции промышленных предприятий и гражданских сооружений», составила 32° и 6,5 м со стороны валки соответственно. Изготовление вруба с такими геометрическими параметрами — сложная техническая проблема. Задача обеспечения опрокидывания здания осложняется и тем, что при такой высоте вруба после наклона здания до касания поверхности земли площадь этого контакта, а следовательно, и площадь опоры здания (при условии неразрушения стенок силосов) значительно увеличиваются. По существующей технологии после образования вруба BCD (рис. 3, а) начнется падение силосного корпуса, при этом центр тяжести O_1 , вращаясь относительно точки опоры B по радиусу BO_1 , опустится с начальной высоты H до высоты h_1 на угол вруба α в точку O_2 , а верхняя точка вруба D , вращаясь по радиусу BD , переместится на угол β , равный углу α , в точку D_1 на поверхности земли, увеличив тем площадь опоры. В результате проекция центра тяжести в точке O_2 не выйдет за пределы площади основания здания (за точку D_1). Следует учитывать, что к моменту касания поверхностью вруба BD земли, здание приобретет некоторую кинетическую энергию, равную по величине потерянной зданием потенциальной энергии E_1 :

$$E_1 = mg(H - h_1), \quad (3)$$

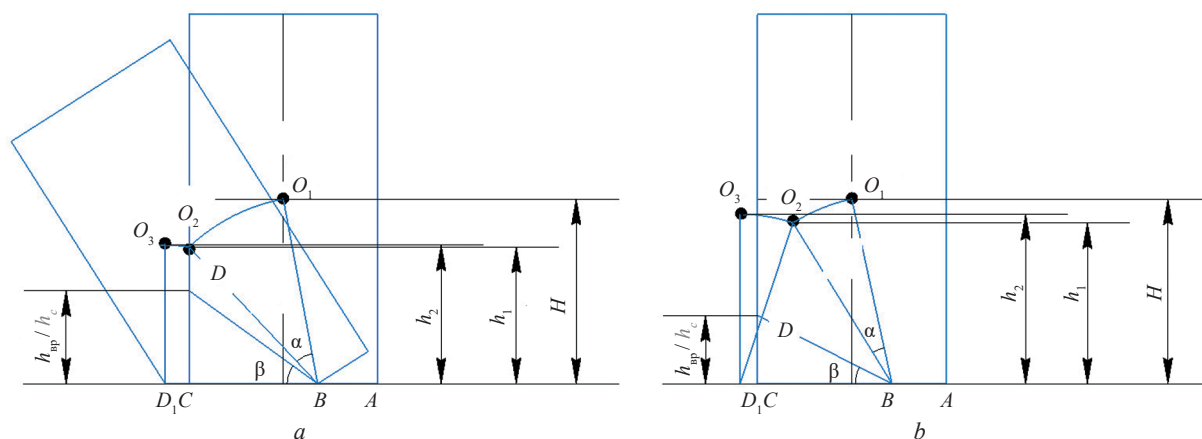


Рис. 3. Условия опрокидывания силосного корпуса: *a* — по существующей технологии; *b* — по предложенной технологии
 Fig. 3. Conditions of silage housing overturning: *a* — according to the existing technology; *b* — according to the proposed technology

где m — масса здания, кг; g — ускорение силы тяжести, m/c^2 ; H — начальная высота центра тяжести здания, м; h_1 — высота центра тяжести здания в точке O_2 , м.

После достижения нижней точки O_2 центр тяжести под действием силы инерции будет продолжать движение. При этом он будет вращаться по радиусу D_1O_2 вокруг точки опоры D_1 и поднимется с высоты h_1 до высоты h_2 в верхнем положении O_3 , после чего проекция центра тяжести окончательно выйдет за основание здания (за точку D_1) и произойдет обрушение здания. Согласно закону сохранения энергии, величина повышения потенциальной энергии здания E_2 (пропорциональная высоте подъема центра тяжести) не может быть больше величины приобретенной зданием кинетической энергии E_1 за вычетом потери энергии на разрушение невзорванной части стен вруба, отрыв целика, деформацию грунта в момент касания земли поверхностью вруба и др. Колебание центра тяжести здания можно представить в виде математического маятника, высота подъема и амплитуда которого в каждую сторону определяются начальной энергией E_1 за вычетом потерь энергии. По приблизительным расчетам прочностных характеристик целика эти потери могут достигать до 70 % от величины E_1 . Величина E_2 рассчитывается по формуле:

$$E_1 = mg(h_2 - h_1), \quad (4)$$

где h_2 — высота центра тяжести здания в верхней точке подъема, м.

По существующей технологии обрушения, как видно из рис. 3, *a*, после наклона здания до касания плоскостью вруба поверхности земли высота последующего подъема центра тяжести здания ($h_2 - h_1$), а соответственно, и потеря кинетической энергии E_2 будут очень малы. Центр тяжести перейдет за пределы площади опоры (BCD_1) и здание упадет.

Для усовершенствования технологии обрушения зданий предлагается использовать эффект ма-

ятника для уменьшения угла и высоты вруба. Поскольку в случае, показанном на рис. 3, *a*, энергия E_1 значительно превышает энергию E_2 , то вполне можно уменьшить высоту вруба. При этом уменьшится величина E_1 и увеличится величина E_2 . Главное условие — величина E_2 не должна превышать 30 % от величины E_1 . Отсюда можно вывести условие обрушения здания:

$$mg(h_2 - h_1) = 0,3 \leq mg(H - h_1), \quad (5)$$

или после преобразования:

$$h_2 \leq 0,3H + 0,7h_1. \quad (6)$$

Таким образом, из выражения (5) видно, что для нормального обрушения здания необходимо, чтобы после его наклона на угол вруба β (рис. 3, *b*) и понижения центра тяжести с высоты H до высоты h_1 последующий подъем центра тяжести от высоты h_1 до высоты h_2 не превышал 30 % величины вышеупомянутого понижения.

Решение геометрической задачи (рис. 3, *b*) показало, что минимальным углом вруба β , при котором выполняется условие (5), является угол 19° . При этом угле вруба последующий подъем центра тяжести элеватора составляет точно 30 % от величины его первоначального снижения. При увеличении угла вруба более 19° условие (5) гарантированно выполняется. Учитывая, что рассчитанный по существующей методике РТМ 36.9–88 угол вруба составил 32° , было предложено уменьшить последний до величины, составляющей не менее $2/3$ от угла α . В описанном выше случае по предлагаемой технологии обрушения элеватора принимаем угол вруба равным $21,5^\circ$, при котором, согласно геометрическим расчетам, после взрыва центр тяжести с начальной высоты $H = 15$ м сначала опустится до высоты $h_1 = 13,0$ м, а затем поднимется до высоты $h_2 = 13,3$ м (на $0,3$ м), что полностью соответствует условию (5). Допустимая высота подъема центра тяжести элеватора, согласно формуле (6), — $13,4$ м. При этом высота вруба составит $3,94$ м.

Табл. 2. Геометрические параметры вруба
Table 2. Geometric parameters of the logging head

Методика расчета Calculation methodology	Высота вруба, м Cutting height, m	Угол вруба, ° Angle of cut, °
РТМ 36.9–88 (существующая) RTM 36.9–88 (existing)	6,5	32
С учетом кинетической энергии (предлагаемая) Considering kinetic energy (proposed)	3,94	21,5

Геометрические значения параметров вруба по существующей и предложенной технологии представлены в табл. 2.

Метод контролируемого взрыва представляет собой сложный инженерный процесс, требующий точного расчета и специальных решений. В научной практике для прогнозирования результатов обрушения используются методы численного моделирования. Для того чтобы подтвердить результативность проведенного расчета перед практической реализацией, в программе ANSYS было смоделировано падение здания элеватора с геометрическими параметрами вруба, рассчитанными по методике, учитывающей кинетическую энергию. Схема падения показана на рис. 4.

По итогам моделирования в программе ANSYS здание обрушилось, что подтверждает эффективность предлагаемой методики обрушения в заданном направлении перед проведением специальных взрывных работ в г. Ярославле.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На основании выполненных расчетов на рис. 5 приведена усовершенствованная схема вруба перед обрушением здания элеватора.

Рассчитанные величины высоты и угла вруба и, как следствие этого, объем специальных взрывных работ по обрушению четырех силосных корпусов элеватора в г. Ярославле были уменьшены в 1,6 раза. Для дополнительного уменьшения объема специальных взрывных работ стенки силосов со стороны падения и с боковых сторон корпуса здания элеватора разобраны механическим способом на всю высоту и глубину вруба, равную половине диаметра силосов, что еще уменьшило примерно в 2 раза объем взрывных работ. Использование гибридного метода, включающего демонтаж, механический снос и контролируемый взрыв, позволяет сократить энергетические затраты на деконструкцию. Произведен расчет прочности оставшейся части стенок силосов, показавший, что стенки выдержат давление здания на оставшуюся площадь опоры без разрушения до момента производства взрывных работ. Стены врубовой зоны второго ряда и не демонтированной части первого ряда силосов были прошпурены в соответствии с заданным углом вруба и рассчитанной сеткой шпуров и заряжены зарядами аммонита. В силосах целика выполнен один ряд

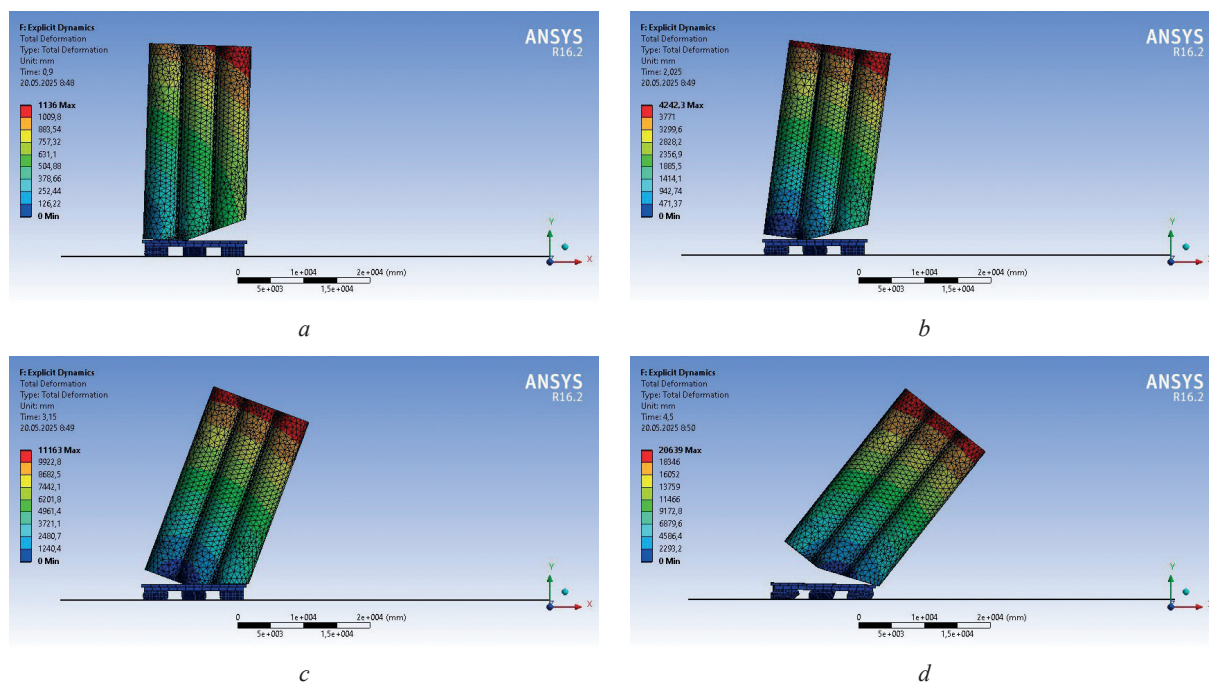


Рис. 4. Моделирование падения элеватора в программе ANSYS

Fig. 4. Modelling of elevator fall in ANSYS programme

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 12, 2025
 Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20, Issue 12, 2025

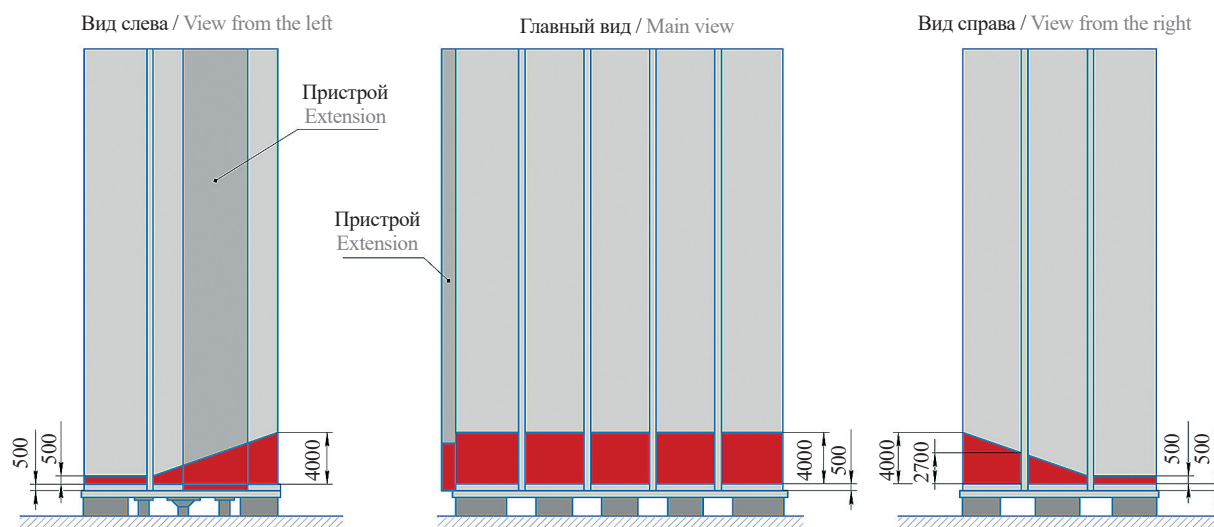


Рис. 5. Схема вруба по предложенной технологии

Fig. 5. Scheme of logging using the proposed technology



Рис. 6. Силосный корпус, подготовленный к взрыву

Fig. 6. Silo enclosure prepared for explosion

шпуров подкола на уровне 0,25 м от опорной плиты силосного корпуса.

Поскольку стенки силосов выполнены из высокопрочного железобетона с большим коэффициентом армирования, существует риск того, что одного только выбивания бетона без разрыва арматуры при взрыве шпуровых зарядов в стенках силосов может быть

недостаточно для столь значительного снижения их прочности, гарантирующего падение здания. Поэтому для придания начального импульса движения силосному корпусу предложено «уронить» опорную плиту силосов вместе с силосным корпусом, для чего в надземной части фундамента опорной плиты со стороны падения и в четырех (из пяти) ближайших рядах колонн подсилосной части на высоту 1 м были пробурены шпуровые заряды и заряжены аммонитом. Взрыв силосного корпуса и подсилосной части производился одновременно. Силосный корпус, подготовленный к взрыву, представлен на рис. 6.

Взрывные работы по обрушению элеватора в г. Ярославле проводились при температуре -35°C . В этих условиях в качестве забойки шпуров использован смоченный водой снег. При этом забойка мгновенно затвердевала в шпуре, превращаясь в лед. Для обеспечения безопасности при выполнении специальных взрывных работ рассчитаны безопасные расстояния по ряду факторов, представленные в табл. 3.

Процесс падения силосного корпуса после взрыва показан на рис. 7.

В результате проведенных исследований по предложенной технологии сноса элеватора с использовани-

Табл. 3. Безопасные расстояния

Table 3. Safety distances

Объект Object	Расчетный радиус опасной зоны, м Estimated radius of the danger zone, m			Принятое значение радиуса опасной зоны, м Accepted value of the hazardous area radius, m
	по разлету кусков бетона concrete spalling	по действию ударной воздушной волны by the effects of a shock air wave	по действию ядовитых газов by the effects poisonous gases	
Здание элеватора Elevator building	200	176	150	200



Рис. 7. Обрушение силосного корпуса по предложенной технологии через: *a* — 0 с после подрыва; *b* — 1 с; *c* — 2 с; *d* — 3 с; *e* — 4 с; *f* — 5 с

Fig. 7. Collapse of the silo building using the proposed method after: *a* — 0 s after detonation; *b* — 1 s; *c* — 2 s; *d* — 3 s; *e* — 4 s; *f* — 5 s.

ем эффекта маятника в момент взрыва все 4 силосных корпуса были обрушены, что подтвердило правильность произведенных расчетов и показало возможность использования данной технологии и для других аналогичных работ по реконструкции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методика обрушения здания элеватора из монолитного железобетона представляет собой новый подход к обрушению зданий в заданном направлении, основанный на использовании кинетической энергии, приобретаемой зданием в момент взрыва, что создает дополнительные силы для его обрушения, не учитываемые при расчетах по существующей методике. Предложенная технология направленного обрушения конструкций методом взрыва позволяет упростить процесс взрывного демонтажа здания с большой площадью опоры и минимизировать трудозатраты.

Проведенные взрывные работы по обрушению зданий элеваторов показали эффективность и практическую значимость предложенного метода. Усовершенствованная методика дает возможность снизить величину вруба на 40 % относительно существующего метода из РТМ 36.9–88, что значительно ускоряет и упрощает специальные взрывные работы, уменьшая время, затрачиваемое на изготовление вруба, снижая риски для окружающих объектов и повышая безопасность рабочих, за счет уменьшения взрывчатого вещества во врубe из-за его уменьшенных геометрических размеров.

Результаты проведенных специальных взрывных работ по обрушению зданий элеваторов в г. Ярославле подтвердили эффективность нового подхода, что открывает перспективы для применения данного метода в иных областях строительства и относительно других обрушаемых зданий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Болотова А.С., Баширова А.В. Специфика различных методов демонтажа зданий // Технология и организация строительного производства. 2016. № 1. С. 11–14. EDN LPGYOZ.

2. Коноплева А.А., Петрова Т.А., Секрий М.А. Особенности демонтажа зданий и сооружений в условиях городской застройки // Инновационное развитие регионов: потенциал науки и современного образования : мат. Нац. науч.-практ. конф. 2018. С. 68–74. EDN WBCSGD.

3. Кужин М.Ф., Моисеева С.А. Организационно-технологические решения при сносе и демонтаже зданий и сооружений // StudNet. 2021. Т. 4. № 5. EDN YPZPCE.

4. Теличко В.Г., Золотов Н.В. Прочность многоэтажного здания из монолитного железобетона с учетом разносопротивляемости и повреждаемости материала // Строительство и реконструкция. 2018. № 6 (80). С. 22–31. EDN YSXCPJ.

5. Смоляго Г.А., Дрокин С.В., Дронов А.В., Белоусов А.П., Смоляго Е.Г. Конструктивная безопасность монолитных железобетонных перекрытий по несущей способности и деформативности // Строительство и реконструкция. 2019. № 4 (84). С. 83–92. DOI: 10.33979/2073-7416-2019-84-4-83-92. EDN RJLHVК.
6. Мазурин Д.М., Дементьева М.Е. Технико-экономические показатели производства работ по демонтажу многоэтажного здания в условиях сложившейся застройки // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 6. С. 741–750. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.6.741-750. EDN SOHXEU.
7. Князев А.А., Краснощекова А.И., Тимошенко Е.А. Особенности демонтажа зданий // Техника и технологии: пути инновационного развития : сб. науч. тр. 7-й Междунар. науч.-практ. конф. 2018. С. 139–141. EDN XVVCKD.
8. Гельдыев М.Т., Аразов Б.М. Технологии сноса зданий // Молодежь и наука: шаг к успеху : сб. науч. ст. 3-й Всеросс. науч. конф. перспективных разработок молодых ученых. 2019. С. 27–30. EDN ISVBQD.
9. Фахратов М.А., Сулейманов Х.А., Болотин О.А. Особенности бетонирования и демонтажа зданий в рамках поэтапной системы // Инновации и инвестиции. 2018. № 4. С. 341–344. EDN BCXDCB.
10. Меруерт С., Овчинников И.И. Экологичные способы демонтажа железобетонных конструкций // Вестник евразийской науки. 2021. Т. 13. № 3. EDN YKRCYM.
11. Rathi S.O., Khandve P.V. Demolition of buildings an overview // International Journal of Advance Engineering and Research Development. 2014. Vol. 1. Issue 6. DOI: 10.21090/ijaerd.010643
12. Menon A.H., Jayaraj G.K. Comparative study of demolition methods // International Journal of Advance Scientific Research and Engineering. 2017. Vol. 2. Issue 2. Pp. 26–31.
13. Bhandari M.G., Kulkarni V.K., Malviya R.K. Building demolition: ground to earth important as construction // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. 2013. Vol. 3. Issue 4. Pp. 396–401.
14. Колодяжный С.А., Золотухин С.Н., Абраменко А.А., Артемова Е.А. Снос зданий и использование материалов, образующихся при реновации городских территорий // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. № 2. С. 271–293. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.2.271-293. EDN OFYCLZ.
15. Isobe D., Jiang R. Explosive demolition planning of building structures using key element index // Journal of Building Engineering. 2022. Vol. 59. P. 104935. DOI: 10.1016/j.jobee.2022.104935
16. Богданов В.Ф., Тимофеев Д.Р. Способы разрушения бетонных, железобетонных и каменных конструкций при реконструкции зданий и сооружений // Socio-economics sciences & humanities : сб. ст. Междунар. науч. конф. 2023. С. 51–53. EDN KGCSTT.
17. Исупов И.А. Анализ технологий демонтажа зданий взрывом и методом «Cut and Take Down» // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2017. Т. 1. С. 307–312. EDN OSLXHB.
18. Suleymanova L.A., Pogorelova I.A., Kirilenko S.V., Suleymanov K.A. Physical basis of destruction of concrete and other building materials // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 327. P. 022082. DOI: 10.1088/1757-899X/327/2/022082
19. Галаева Н.Л. Использование метода взрыва для сноса зданий и сооружений в условиях городской застройки // Перспективы науки. 2019. № 5 (116). С. 54–56. EDN OMIITU.
20. Ваннах М. Почему в России перестали взрывать дома? // Бизнес-журнал. 2013. № 5 (206). С. 84–89.
21. Кутузов Б.Н., Белин В.А., Ганопольский М.И. Критерии, определяющие выбор способа производства специальных взрывных работ // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2014. № 6. С. 336–341. EDN SEHYRJ.
22. Добрынин А.А., Добрынин И.А., Ивченко В.В. Повышение безопасности при организации и проведении взрывных работ на объектах реконструкции и строительства // Безопасность труда в промышленности. 2015. № 4. С. 51–54. EDN TPFVTP.
23. Yabo C., Ning L., Haohao Z., Yujie D., Gongyu M., Weifu S. et al. Application of controlled blasting demolition technology in ultra-high coaxial thin-walled steel inner cylinder reinforced concrete chimney // Case Studies in Construction Materials. 2023. Vol. 18. P. e01936. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e01936
24. Xie Q., Dai H., Qin X., Zhang Z., Huang X., Ouyang D. A method for controlling the blasting effect of reinforced concrete columns // Results in Engineering. 2024. Vol. 24. P. 102068. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102068
25. Modi S.K., Murthy V.M.S.R. Assessment of blasting impacts in underwater concrete berth demolition and development of a Hybrid Controlled Blasting (HCB) technique — A case study // Structures. 2022. Vol. 40. Pp. 420–433. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.04.036
26. Yan J., Liu Y., Yan J., Yan Z., Xu Y., Gao C., Huang F. Collapse of concrete target subjected to embedded explosion of shelled explosive // Engineering Failure Analysis. 2024. Vol. 161. P. 108298. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2024.108298

27. Wu J., Zhou Y., Zhang R., Liu C., Zhang Z. Numerical simulation of reinforced concrete slab subjected to blast loading and the structural damage assessment // *Engineering Failure Analysis*. 2020. Vol. 118. P. 104926. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2020.104926
28. Widanage C., Mohotti D., Lee C.K., Meddage D.P.P., Wijesooriya K. Explainable machine learning-based prediction of blast loads on structural surfaces in two-dimensional spatial coordinates // *Results in Engineering*. 2025. Vol. 26. P. 104979. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.104979
29. Filice A., Mynarz M., Zinno R. Experimental and empirical study for prediction of blast loads // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. Issue 5. P. 2691. DOI: 10.3390/app12052691
30. Peyman S., Eskandari A. Analytical and numerical study of concrete slabs reinforced by steel rebars and perforated steel plates under blast loading // *Results in Engineering*. 2023. Vol. 19. P. 101319. DOI: 10.1016/j.rineng.2023.101319
31. Берсенов Г.П., Кравченко А.Н., Слепенков В.М., Шеменов В.Г. Расчет предохранительных укрытий при производстве взрывных работ в стесненных условиях // *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2010. № 8. С. 103–106. EDN OEDWAL.
32. Aemlaor P., Fujikake K., Sukontasukkul P. Feasibility study on novel blasting technique using linear-shaped charges to cut reinforcing steel bars in reinforced concrete members // *Practice Periodical on Structural Design and Construction*. 2023. Vol. 28. Issue 2. DOI: 10.1061/ppscfx.sceng-1263
33. Патент RU № 2151997С1. Квазар — способ демонтажа зданий, сооружений и строительных конструкций / Каганер Ю.А., Давыдов В.И., Шушко Л.А., Дашков А.Ю., Каганер М.А. Оpubл. 27.06.2000.
34. Филиппов П.А., Гайдин А.П., Машуков И.В., Цинкер Л.М. Технология взрывного обрушения промышленного высотного здания с металлическим несущим каркасом // *Записки Горного института*. 2001. Т. 148. № 2. С. 97–98.
35. Ненахов И.А., Фоменкова В.Е., Кириллов С.С., Ганопольский М.И. Опыт применения шнуровых кумулятивных зарядов на взрывных работах по обрушению сооружений // *Евразийский Союз Ученых*. 2015. № 8–2 (17). С. 86–89. EDN WXDYBV.
36. Патент RU № 2374605С1. Способ обрушения здания взрывом / Добрынин А.А., Добрынин И.А. Оpubл. 27.11.2009. Бюл. № 33.
37. Великанов Н.Л., Наумов В.А., Тарасов Д.А. Использование ударного разрушения при сносе строительных конструкций // *Известия КГТУ*. 2011. № 20. С. 48–53. EDN OGBLON.
38. Тарасов Д.А. Методы ударного разрушения строительных конструкций // *Инновации в науке и образовании – 2010* : тр. VIII Междунар. науч. конф., посвящ. 80-летию образования университета. 2010. С. 258–260. EDN ZSZDZN.
39. Шевцов Н.Р., Рублёва О.И., Стрильчук Р.А. Построение методики определения параметров разрушения зданий и сооружений взрывом накладных зарядов в водяной оболочке // *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Гірничо-геологічна*. 2014. № 2 (21). С. 88–94. EDN VRBHTJ.
40. Патент RU № 2375673С1. Способ подрыва опоры / Добрынин А.А., Добрынин И.А. Оpubл. 10.12.2009. Бюл. № 34.
41. Патент RU № 2301398С1. Способ разрушения зданий / Ведяшкин А.С. Оpubл. 20.06.2007. Бюл. № 17.
42. Патент RU № 2318178С1. Способ обрушения здания или сооружения / Белин В.А., Каркашадзе Г.Г., Ефремовцев А.Н., Ефремовцев Н.Н. Оpubл. 27.02.2008. Бюл. № 6.
43. Guo X., Li Y., McCrum D. P., Hu Y., Bai Z., Zhang H. et al. A Reinforced Concrete Shear Wall Building Structure Subjected to Internal TNT Explosions: Test Results and Numerical Validation // *International Journal of Impact Engineering*. 2024. Vol. 190. P. 104950. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2024.104950
44. Luccioni B.M., Ambrosini R.D., Danesi R.F. Analysis of building collapse under blast loads // *Engineering Structures*. 2004. Vol. 26. Issue 1. Pp. 63–71. DOI: 10.1016/j.engstruct.2003.08.011
45. Мандрица Д.П., Мачнев С.А., Загрудников Ю.А., Закиров Р.Ф. Исследование напряженно-деформированного состояния изгибаемых железобетонных элементов на действие ударной волны взрыва // *Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму*. 2018. № 1–2 (115–116). С. 98–103. EDN YOSJII.
46. Liu Y., Yan J., Li Z., Huang F. Improved SDOF and numerical approach to study the dynamic response of reinforced concrete columns subjected to close-in blast loading // *Structures*. 2019. Vol. 22. Pp. 341–365. DOI: 10.1016/j.istruc.2019.08.014
47. Astarlioglu S., Krauthammer T., Morency D., Tran T.P. Behavior of reinforced concrete columns under combined effects of axial and blast-induced transverse loads // *Engineering Structures*. 2013. Vol. 55. Pp. 26–34. DOI: 10.1016/j.engstruct.2012.12.040
48. Roy T., Matsagar V. Probabilistic framework for failure investigation of reinforced concrete wall panel under dynamic blast loads // *Engineering Failure Analysis*. 2021. Vol. 125. P. 105368. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2021.105368
49. Ганопольский М.И., Барон В.Л. Буровзрывные работы при разборке строений Центральной обогатительной фабрики «Горняцкая» ОАО «Ростовуголь» // *Взрывное дело*. 2018. № 120–77. С. 188–210. EDN VNJKIO.

50. Ганопольский М.И., Барон В.Л. Буровзрывные работы при разборке главного корпуса центральной обогатительной фабрики «Несветай» ОАО «Ростовуголь» // Взрывное дело. 2017. № 118–75. С. 238–259. EDN YNWUMG.

51. Ганопольский М.И., Барон В.Л. Взрывное обрушение монолитного железобетонного здания // Взрывное дело. 2017. № 117–74. С. 216–237. EDN YHRYAJ.

52. Ганопольский М.И., Барон В.Л. Взрывные работы при демонтаже металлической вентиляционной трубы // Взрывное дело. 2018. № 120–77. С. 169–187. EDN YPNAQX.

53. Зеленин М.Ю., Хабибулин В.Р., Гущенко Д.Е., Барон В.Л., Ганопольский М.И. Взрывные работы по направленному обрушению железобетонной трубы высотой 150 метров в г. Ижевск (Удмуртия) // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2016. № 6. С. 149–160. EDN TYKFMU.

54. Хамитов Т.К., Хайруллин Б.Т., Аюпов И.И. Расчет несущей способности дымовой трубы при демонтаже // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. № 3 (49). С. 229–235. EDN ZENGDD.

55. Sun J., Jia Y., Yao Y., Xie X. Experimental investigation of stress transients of blasted RC columns in the blasting demolition of buildings // Engineering

Structures. 2020. Vol. 210. P. 110417. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110417

56. Rajkumar D., Senthil R., Kumar B.B.M., Gomathi K.A., Velan S.M. Numerical study on parametric analysis of reinforced concrete column under blast loading // Journal of Performance of Constructed Facilities. 2020. Vol. 34. Issue 1. DOI: 10.1061/(asce)cf.1943-5509.0001382

57. Lv C., Yan Q., Li L., Li S. Field test and probabilistic vulnerability assessment of a reinforced concrete bridge pier subjected to blast loads // Engineering Failure Analysis. 2023. Vol. 143. P. 106802. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2022.106802

58. Lin S.C., Hu Z.Q., Han J.Q., Yang B., Elchalaikani M. Failure time of reinforced concrete column under blast load // Structures. 2023. Vol. 53. Pp. 1122–1134. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.04.128

59. Gao W., Kou Y., Yan T., Sun H., Li S. Case study on the effect of delay-time differences between columns during blasting demolition of RC structures with a small height-to-width ratio // Applied Sciences. 2023. Vol. 13. Issue 11. P. 6765. DOI: 10.3390/app13116765

60. Dahiya D., Laishram B. Energy analysis of high-rise residential buildings under demolition using controlled explosion: An Indian case study // Journal of Cleaner Production. 2023. Vol. 426. P. 139190. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.139190

Поступила в редакцию 14 мая 2025 г.

Принята в доработанном виде 27 октября 2025 г.

Одобрена для публикации 21 ноября 2025 г.

О Б АВТОРАХ: **Юрий Петрович Желуницын** — доктор технических наук, профессор кафедры технологии твердых химических веществ; Самарский государственный технический университет (СамГТУ); 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244; SPIN-код: 4675-9457, РИНЦ ID: 982673, ORCID: 0000-0002-5783-3121; zhelunitsyn51@mail.ru;

Олег Сергеевич Рахманин — кандидат технических наук, доцент кафедры технологии твердых химических веществ; Самарский государственный технический университет (СамГТУ); 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244; SPIN-код: 2411-5263, РИНЦ ID: 852108, Scopus: 57189712694, ResearcherID: B-9091-2016, ORCID: 0000-0002-5783-3121; rakhmanin.os@samgtu.ru;

Мария Сергеевна Гречухина — кандидат технических наук, доцент кафедры технологии твердых химических веществ; Самарский государственный технический университет (СамГТУ); 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244; SPIN-код: 6179-8126, РИНЦ ID: 1057141, Scopus: 57214888777, ResearcherID: ABF-3158-2020, ORCID: 0000-0001-7797-3802; mariya_grechukhina@mail.ru;

Александра Владиславовна Куцепалова — аспирант кафедры технологии твердых химических веществ; Самарский государственный технический университет (СамГТУ); 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244; SPIN-код: 3267-1193, РИНЦ ID: 1262976, ResearcherID: OUH-8190-2025, ORCID: 0009-0007-8801-6769; al.kutsepalova@mail.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Bolotova A.S., Bashkirova A.V. Specification of various methods of dismantling buildings. *Technology and Organization of Construction Production*. 2016; 1:11-14. EDN LPGYOZ. (rus.).

2. Konopleva A.A., Petrova T.A., Sekrii M.A. Features of dismantling buildings and structures in urban development. *Innovative development of regions: the potential of science and modern education : materials of the Na-*

- tional scientific and practical conference. 2018; 68-74. EDN WBCSGD. (rus.).
3. Kuzhin M.F., Moiseeva S.A. Organizational and technological solutions during the removal and dismantling of buildings and structures. *StudNet*. 2021; 4:5. EDN YPZPCE. (rus.).
 4. Telichko V.G., Zolotov N.V. The strength of high-rise buildings from monolithic reinforced concrete taking into account different resistance and damage of material. *Building and Reconstruction*. 2018; 6(80):22-31. EDN YSXCPJ. (rus.).
 5. Smolyago G.A., Drokin S.V., Dronov A.V., Belousov A.P., Smolyago E.G. Assessment of structural safety in strength and durability of the corrugated concrete slab. *Building and Reconstruction*. 2019; 4(84):83-92. DOI: 10.33979/2073-7416-2019-84-4-83-92. EDN RJHKBK. (rus.).
 6. Mazurin D.M., Dement'eva M.E. Dismantling a multi-storey building in the conditions of a built-up area: engineering and economic indicators. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(6):741-750. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.6.741-750. EDN SOHXEU.(rus.).
 7. Knyazev A.A., Krasnoshchekova A.I., Timoshenko E.A. Features of dismantling buildings. *Engineering and technology: ways of innovative development : collection of scientific papers of the 7th International scientific and practical conference*. 2018; 139-141. EDN XVBCKD. (rus.).
 8. Geldyev M.T., Arazov B.M. Building demolition technologies. *Youth and science: a step towards success : a collection of scientific articles from the 3rd All-Russian scientific conference of promising developments of young scientists*. 2019; 27-30. EDN ISVBQD. (rus.).
 9. Fakhratov M.A., Suleimanov H.A., Bolotin O.A. Features of concreting and dismantling buildings with-in the framework of an element-by-element system. *Innovation & Investment*. 2018; 4:341-344. EDN BCXDCB. (rus.).
 10. Meruyert S., Ovchinnikov I.I. Eco methods of dismantling reinforced concrete structures. *Eurasian Scientific Journal*. 2021; 13:3. EDN YKRCYM. (rus.).
 11. Rathi S.O., Khandve P.V. Demolition of buildings an overview. *International Journal of Advance Engineering and Research Development*. 2014; 1(6). DOI: 10.21090/ijaerd.010643
 12. Menon A.H., Jayaraj G.K. Comparative study of demolition methods. *International Journal of Advance Scientific Research and Engineering*. 2017; 2(2):26-31.
 13. Bhandari M.G., Kulkarni V.K., Malviya R.K. Building demolition: ground to earth important as construction. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 2013; 3(4):396-401.
 14. Kolodyazhny S.A., Zolotukhin S.N., Abramenko A.A., Artemova Ye.A. Destruction of buildings and use of materials from renovated urban territories. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(2):271-293. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.2.271-293. EDN OFYCLZ. (rus.).
 15. Isobe D., Jiang R. Explosive demolition planning of building structures using key element index. *Journal of Building Engineering*. 2022; 59:104935. DOI: 10.1016/j.jobee.2022.104935
 16. Bogdanov V.F., Timofeev D.R. Methods of destruction of concrete, reinforced concrete and stone structures during reconstruction of buildings and structures. *Socio-economics sciences & humanities : collection of articles from the international scientific conference*. 2023; 51-53. EDN KGCTT. (rus.).
 17. Isupov I.A. Analysis of technologies of stripping of buildings explosion and by the “Cut and Take Down” method. *Modern Technologies in Construction. Theory and Practice*. 2017; 1:307-312. EDN OSLXHB. (rus.).
 18. Suleymanova L.A., Pogorelova I.A., Kirilenko S.V., Suleymanov K.A. Physical basis of destruction of concrete and other building materials. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2018; 327:022082. DOI: 10.1088/1757-899X/327/2/022082
 19. Galaeva M.L. The explosion method for demolition of buildings and structures in conditions of urban environment. *Science Prospects*. 2019; 5(116):54-56. EDN OMIITU. (rus.).
 20. Vannakh M. Why did they stop blowing up houses in Russia? *Business Magazine*. 2013; 5(206): 84-89. (rus.).
 21. Kutuzov B.N., Belin V.A., Ganopol'skij M.I. The criteria defining a choice of a way of production of special explosive works. *Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*. 2014; 6:336-341. EDN SEHYRJ. (rus.).
 22. Dobrynin A.A., Dobrynin I.A., Ivchenko V.V. Improving safety in organizing and conducting blasting operations at reconstruction and construction sites. *Occupational Safety in Industry*. 2015; 4:51-54. EDN TPFVTP. (rus.).
 23. Yabo C., Ning L., Haohao Z., Yujie D., Gongyu M., Weifu S. et al. Application of controlled blasting demolition technology in ultra-high coaxial thin-walled steel inner cylinder reinforced concrete chimney. *Case Studies in Construction Materials*. 2023; 18:e01936. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e01936
 24. Xie Q., Dai H., Qin X., Zhang Z., Huang X., Ouyang D. A method for controlling the blasting effect of reinforced concrete columns. *Results in Engineering*. 2024; 24:102068. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102068
 25. Modi S.K., Murthy V.M.S.R. Assessment of blasting impacts in underwater concrete berth demolition and development of a Hybrid Controlled Blasting (HCB) technique — A case study. *Structures*. 2022; 40:420-433. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.04.036
 26. Yan J., Liu Y., Yan J., Yan Z., Xu Y., Gao C., Huang F. Collapse of concrete target subjected to em-

bedded explosion of shelled explosive. *Engineering Failure Analysis*. 2024; 161:108298. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2024.108298

27. Wu J., Zhou Y., Zhang R., Liu C., Zhang Z. Numerical simulation of reinforced concrete slab subjected to blast loading and the structural damage assessment. *Engineering Failure Analysis*. 2020; 118:104926. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2020.104926

28. Widanage C., Mohotti D., Lee C.K., Meddage D.P.P., Wijesooriya K. Explainable machine learning-based prediction of blast loads on structural surfaces in two-dimensional spatial coordinates. *Results in Engineering*. 2025; 26:104979. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.104979

29. Filice A., Mynarz M., Zinno R. Experimental and empirical study for prediction of blast loads. *Applied Sciences*. 2022; 12(5):2691. DOI: 10.3390/app12052691

30. Peyman S., Eskandari A. Analytical and numerical study of concrete slabs reinforced by steel rebars and perforated steel plates under blast loading. *Results in Engineering*. 2023; 19:101319. DOI: 10.1016/j.rineng.2023.101319

31. Bersenev G.P., Kravchenko A.N., Slepnev V.M., Shemenov V.G. Calculation of safety shelters during blasting operations in cramped conditions. *News of Higher Educational Institutions. Mining Journal*. 2010; 8:103-106. EDN OEDWAL. (rus.).

32. Aemlaor P., Fujikake K., Sukontasukkul P. Feasibility study on novel blasting technique using linear-shaped charges to cut reinforcing steel bars in reinforced concrete members. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*. 2023; 28(2). DOI: 10.1061/ppscfx.sceng-1263

33. Patent RU No. 2151997C1. *Quasar — a method for dismantling buildings, structures, and building structures* / Kaganer Yu.A., Davydov V.I., Shushko L.A., Dashkov A.Yu., Kaganer M.A. Publ. 27.06.2000. (rus.).

34. Filippov P.A., Gaidin A.P., Mashukov I.V., Tsinker L.M. Technology of explosive demolition of an industrial high-rise building with a metal bearing frame. *Journal of Mining Institute*. 2001; 148(2):97-98. (rus.).

35. Nenakhov I.A., Fomenkova V.E., Kirillov S.S., Ganopolsky M.I. Experience of using cord cumulative charges in blasting operations to collapse structures. *Eurasian Union of Scientists*. 2015; 8-2(17):86-89. EDN WXDYBV. (rus.).

36. Patent RU No. 2374605C1. *Method of collapsing a building by explosion* / Dobrynin A.A., Dobrynin I.A. Published. 27.11.2009. Bull. No. 33. (rus.).

37. Velikanov N.L., Naumov V.A., Tarasov D.A. Use of impact destruction in demolition of building structures. *KSTU News*. 2011; 20:48-53. EDN OGBLON. (rus.).

38. Tarasov D.A. Methods of impact destruction of building structures. *Innovations in Science and Education – 2010 : Proceedings of the VIII International Scientific Conference dedicated to the 80th anniversary of the university*. 2010; 258-260. EDN ZSZDZN. (rus.).

39. Shevtsov N.R., Rubljova O.I., Strelchuk R.A. Construction of methodology of determination of parameters of destruction of building and building by explosion of the superimposed charges in aquatic shell. *Scientific works of Donetsk National Technical University. Series: Mining and Geology*. 2014; 2(21):88-94. EDN VRBHTJ. (rus.).

40. Patent RU No. 2375673C1. *Method of undermining a support* / Dobrynin A.A., Dobrynin I.A. Published 12/10/2009. Bull. No. 34. (rus.).

41. Patent RU No. 2301398C1. *Method of demolishing buildings* / Vedyashkin A.S. Published 20.06.2007. Bull. No. 17. (rus.).

42. Patent RU No. 2318178C1. *The ability of a building or structure to collapse* / Belin V.A., Karkashadze G.G., Efremovtsev A.N., Efremovtsev N.N. Publ. 02.27.2008. Bull. No. 6. (rus.).

43. Guo X., Li Y., McCrum D. P., Hu Y., Bai Z., Zhang H. et al. A Reinforced Concrete Shear Wall Building Structure Subjected to Internal TNT Explosions: Test Results and Numerical Validation. *International Journal of Impact Engineering*. 2024; 190:104950. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2024.104950

44. Luccioni B.M., Ambrosini R.D., Danesi R.F. Analysis of building collapse under blast loads. *Engineering Structures*. 2004; 26(1):63-71. DOI: 10.1016/j.engstruct.2003.08.011

45. Mandritsa D.P., Machnev S.A., Zagrutdinov Yu.A., Zakirov R.F. Probe is intense-deformed conditions of bent ferro -concrete elements on operation of a shock wave of explosion. *Defense Engineering Problems. Series 16. Technical means of combating terrorism*. 2018; 1-2(115-116):98-103. EDN YOSJII. (rus.).

46. Liu Y., Yan J., Li Z., Huang F. Improved SDOF and numerical approach to study the dynamic response of reinforced concrete columns subjected to close-in blast loading. *Structures*. 2019; 22:341-365. DOI: 10.1016/j.istruc.2019.08.014

47. Astarlioglu S., Krauthammer T., Morency D., Tran T.P. Behavior of reinforced concrete columns under combined effects of axial and blast-induced transverse loads. *Engineering Structures*. 2013; 55:26-34. DOI: 10.1016/j.engstruct.2012.12.040

48. Roy T., Matsagar V. Probabilistic framework for failure investigation of reinforced concrete wall panel under dynamic blast loads. *Engineering Failure Analysis*. 2021; 125:105368. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2021.105368

49. Ganopolsky M.I., Baron V.L. Drilling and blasting operations during dismantling of buildings of the Central enrichment plant “Gornyataskaya”

of OJSC “Rostovugol”. *Explosion Technology*. 2018; 120-77:188-210. EDN VNJKIO. (rus.).

50. Ganopolsky M.I., Baron V.L. Drilling and blasting operations during dismantling the main building of the central enrichment plant “Nesvetai” of OJSC “Rostovugol”. *Explosion Technology*. 2017; 118-75:238-259. EDN YNWUMG. (rus.).

51. Ganopolsky M.I., Baron V.L. Explosive collapse of a monolithic reinforced concrete building. *Explosion Technology*. 2017; 117-74:216-237. EDN YHPYAJ. (rus.).

52. Ganopolsky M.I., Baron V.L. Blasting operations during dismantling of a metal ventilation pipe. *Explosion Technology*. 2018; 120-77:169-187. EDN YPHAQX. (rus.).

53. Zelenin M.Yu., Khabibulin V.R., Guchenko D.E., Baron V.L., Ganopol'skiy M.I. Blasting for directed collapse of a reinforced concrete pipe with a height of 150 m in Izhevsk (Udmurtia). *Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*. 2016; 6:149-160. EDN TYKFMU. (rus.).

54. Khamitov T.K., Khairullin B.T., Ayupov I.I. Calculation of the carrying capacity of the chimney during dismantling. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2019; 3(49):229-235. EDN ZENGDD. (rus.).

55. Sun J., Jia Y., Yao Y., Xie X. Experimental investigation of stress transients of blasted RC columns

in the blasting demolition of buildings. *Engineering Structures*. 2020; 210:110417. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110417

56. Rajkumar D., Senthil R., Kumar B.B.M., Gomathi K.A., Velan S.M. Numerical study on parametric analysis of reinforced concrete column under blast loading. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2020; 34(1). DOI: 10.1061/(asce)cf.1943-5509.0001382

57. Lv C., Yan Q., Li L., Li S. Field test and probabilistic vulnerability assessment of a reinforced concrete bridge pier subjected to blast loads. *Engineering Failure Analysis*. 2023; 143:106802. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2022.106802

58. Lin S.C., Hu Z.Q., Han J.Q., Yang B., Elchalakani M. Failure time of reinforced concrete column under blast load. *Structures*. 2023; 53:1122-1134. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.04.128

59. Gao W., Kou Y., Yan T., Sun H., Li S. Case study on the effect of delay-time differences between columns during blasting demolition of RC structures with a small height-to-width ratio. *Applied Sciences*. 2023; 13(11):6765. DOI: 10.3390/app13116765

60. Dahiya D., Laishram B. Energy analysis of high-rise residential buildings under demolition using controlled explosion: An Indian case study. *Journal of Cleaner Production*. 2023; 426:139190. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.139190

Received May 14, 2025.

Adopted in revised form on October 27, 2025.

Approved for publication on November 21, 2025.

BI O N O T E S : **Yurii P. Zhelunitsyn** — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Solid Chemicals Technology; **Samara State Technical University**; 244 Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation; SPIN-code: 4675-9457, ID RSCI: 982673, ORCID: 0000-0002-5783-3121; zhelunitsyn51@mail.ru;

Oleg S. Rakhmanin — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Solid Chemicals Technology; **Samara State Technical University**; 244 Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation; SPIN-code: 2411-5263, ID RSCI: 852108, Scopus: 57189712694, ResearcherID: B-9091-2016, ORCID: 0000-0002-5783-3121; rakhmanin.os@samgtu.ru;

Mariia S. Grechukhina — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Solid Chemicals Technology; **Samara State Technical University**; 244 Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation; SPIN-code: 6179-8126, ID RSCI: 1057141, Scopus: 57214888777, ResearcherID: ABF-3158-2020, ORCID: 0000-0001-7797-3802; mariya_grechukhina@mail.ru;

Aleksandra V. Kutsepalova — postgraduate student of the Department of Solid Chemicals Technology; **Samara State Technical University**; 244 Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation; SPIN-code: 3267-1193, ID RSCI: 1262976, ResearcherID: OUH-8190-2025, ORCID: 0009-0007-8801-6769; al.kutsepalova@mail.ru.

Contribution of the authors: all authors made equivalent contributions to the publication.

The authors declare that there is no conflict of interest.