

## Нелинейный расчет встроенного подземного сооружения на воздействие воздушной ударной волны с учетом обрушения надземной части

*О. В. Мкртычев, А. Ю. Савенков*

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет*

**Аннотация:** Рассмотрено применение газодинамического метода с использованием нелинейной динамики к расчету встроенного в нижний этаж подземного сооружения на воздействие воздушной ударной волны с учетом обрушения надземной части здания. Известно, что воздействовать на встроенные подземные сооружения, предназначенные для защиты населения и территории от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, может возможное обрушение или завал от вышестоящего здания, при напоре на него воздушной ударной волны. Данная задача является актуальной, так как действующие методики основаны на линейных статических методах расчета и предполагают определенные допущения, в том числе, при расчете на обрушение, и все это может привести к трудно оценимым погрешностям в результатах расчётов. Поэтому, при решении данных задач, которые являются высоконелинейными, а сами рассматриваемые процессы быстротекущи, необходимо рассматривать применение более адекватных и точных методов, основанных на более строгих постановках, каким и является газодинамический метод с использованием нелинейной динамики.

**Ключевые слова:** аварийные взрывные воздействия, воздушная ударная волна, импульсные воздействия, нелинейная газодинамика, фаза сжатия, фаза разряжения, подземные сооружения, “Ambient” -элементы, эйлеровы сетки, прогрессирующее обрушение, обрушение конструкций, разрушение конструкций.

### Введение

Известно, что воздушная ударная волна, при взаимодействии с сооружением, влияет на его надземную и подземную части (рис.1). Данный процесс является сложным, так, в начале процесса взаимодействия, воздушная ударная волна воздействует на наружные конструкции надземной части здания и на поверхность грунта перед зданием, вызывая в нем волну сжатия, которая, в свою очередь, влияет на фронтальную наружную грань подземной части. Далее, воздушная ударная волна, проходя сквозь структурные неоднородности строительных конструкций в виде оконных и дверных проемов, воздействует на внутренние несущие и ненесущие конструкции здания, а также на покрытие подземной части [1, 2]. В то же

время волны сжатия в грунте воздействуют на боковые и тыльную стены подземной части.

Вследствие такого воздействия, верхняя часть здания может получить значительные повреждения и обрушиться на покрытие подземного встроенного сооружения, так как надземные части зданий, как правило, не рассчитаны на подобные нагрузки.

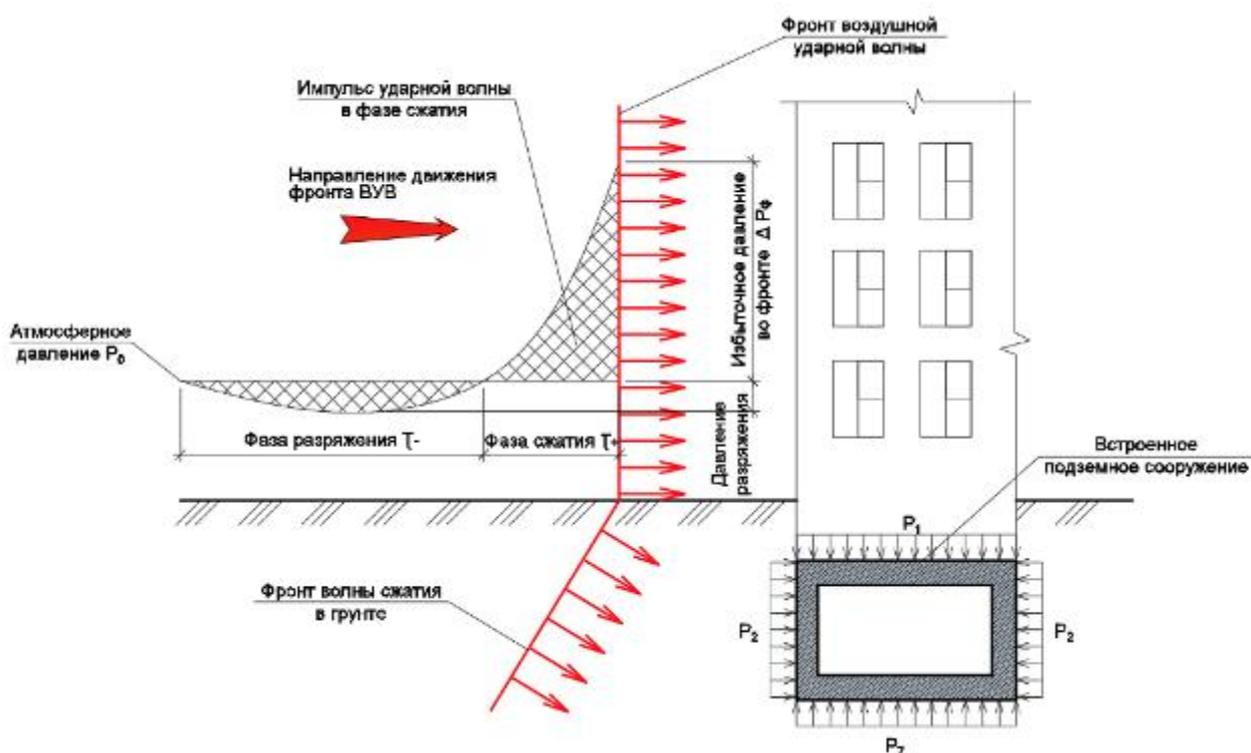


Рис. 1. – Схема воздействия воздушной ударной волны на надземную и подземную часть здания

Подземная часть здания, если в ней предусматривается размещение населения на период аварийных ситуаций, должна обладать необходимой прочностью для восприятия такого сложного процесса воздействия. Т.е., во-первых, расчет подземной части должен выполняться с учетом воздействия воздушной ударной волны (покрытие) и волн сжатия (стены), а во-вторых, воздействия от падения разрушаемых строительных конструкций надземного здания, а также нагрузки от завала, образуемого после полного разрушения надземной части.

При этом, единственным нормативным методом расчета подземных сооружений на воздействие воздушных ударных волн, а также на нагрузки от завала, является эквивалентный статический метод, допускающий определенные допущения. Так, при расчете на обрушение вес обрушившихся конструкций прикладывается равномерно по всей площади покрытия защитного сооружения с учетом коэффициента динамичности  $K_d=1,2$ . При этом предполагается, что воздействие избыточного давления от ударной волны на подземное сооружение в момент формирования завала на покрытии, уже прошло. Таким образом, условием для расчета на вес завала является превышение половины массы обрушаемых конструкций над избыточным давлением в воздушной ударной волне. То есть, если установлено, что вес завала превышает избыточное давление, то расчет необходимо производить в два этапа. На первом этапе выполняется расчет встроенного подземного сооружения на воздействие ударных волн, причем, необходимо учитывать в расчетной модели надземную часть здания. На втором этапе надземная часть из модели исключается, но на покрытие подземного сооружения задается эквивалентная статическая нагрузка от разрушившихся конструкций. Итоговое решение по толщине и армированию принимается по результатам анализа обоих случаев воздействия.

Как видно, данный подход предполагает значительные допущения, и не учитывает реальный процесс воздействия, что может привести к иному распределению усилий в конструкциях.

Учитывая вышесказанное, можно отметить всю сложность происходящего процесса, поэтому такие задачи целесообразно решать в более строгой и полной постановке [3], где данный расчет можно выполнить в один этап. Для этого будем использовать газодинамический подход с использованием нелинейной динамики [4, 5] и целью данного исследования является разработка расчетной модели для расчета подземной части здания,

---

встроенного в подвальный этаж, на воздействие воздушной ударной волны с учетом обрушения строительных конструкций вышележащих этажей здания.

При расчете газодинамическим методом, в программном комплексе из объемных конечных элементов создается воздушная и грунтовая области, в которые помещается сооружение с надземной и подземной частью. На границе воздушной области задается воздействие фронта воздушной ударной волны.

Процессы взаимодействия ударных волн с надземным и подземным сооружением подробно описаны в [4] и [5], соответственно, но данные задачи были решены отдельно для каждого случая. Поэтому задача о полном процессе взаимодействия ударных волн с сооружением, является актуальной. Кроме того, задача о разрушении с формированием завала также является актуальной, и требует анализа, так как при этом необходимо моделировать процесс образования и распространения вторичных осколков разрушившихся строительных конструкций.

С целью формирования расчетной модели для расчета встроенного подземного сооружения выполнены следующие отдельные задачи:

- исследование методов моделирования разрушения строительных конструкций;
- анализ экспериментальных данных существующих исследований разрушений строительных конструкций при воздействии ударной волны;
- разработка расчетной модели для моделирования разрушения многоэтажного монолитного здания.

### **Методы моделирования разрушения строительных конструкций**

При использовании нелинейных динамических методов в современных программных комплексах существуют различные варианты моделирования разрушения строительных конструкций. Для моделирования разрушения с

---

формированием вторичных осколков в программном комплексе LS-Dyna возможно использование трех методов:

– одним из вариантов моделирования разрушений является способ, когда разрушенный элемент исключается из модели и не участвует далее в моделировании. Данный способ актуален для задач, когда поведение разрушенных элементов не имеет значение после разрушения. В данном случае, формирование вторичных осколков происходит только за счет тех элементов, что держались в схеме за счет элементов, выключенных из расчетной модели. При этом, при падении на какое-либо препятствие, например, как покрытие подземного сооружения, они могут разрушаться, что также приводит к тому, что они выбывают из расчета, не позволяя формировать завал;

– использование разрывов связей в узлах между элементами при достижении заданного параметра разрушения. Данный способ позволяет моделировать разрушение, так как при разрыве связей разделенные элементы не выбывают из расчетной модели, и могут, падая, воздействовать на другие конструкции, так как сохраняется масса и кинематические параметры исходного элемента конструкции. Недостатком такого метода является то, что критерии разрушения в узловых связях задаются независимыми от параметров исходных критериев заданного материала и не всегда могут соответствовать друг другу, поэтому данный подход является нереалистичным;

– использование DES-элементов, которые выполняют адаптивное преобразование лагранжевой твердотельной конструкции в частицы (элементы) DES (Discrete Element Sphere) в случае отказа конструкции. Для каждого вышедшего из строя элемента генерируется одна или несколько частиц DES в виде обломков. Частицы DES, заменяющие отказавший

---

элемент, наследуют свойства отказавшего твердого элемента, в том числе массу и кинематическое состояние.

Наиболее адекватным при моделировании разрушения строительных конструкций является применение DES-элементов, но при этом важным вопросом является выбор соответствующей модели материала. Выбор подходящих определяющих моделей для материалов играет ключевую роль в нелинейном динамическом моделировании. Рассмотрим модель материала бетона Continuous Surface Cap Model (CSCM), где соотношения между напряжением и деформацией в бетоне описываются моделью сплошной поверхности, с наличием так называемого «колпачка» (рис. 2).

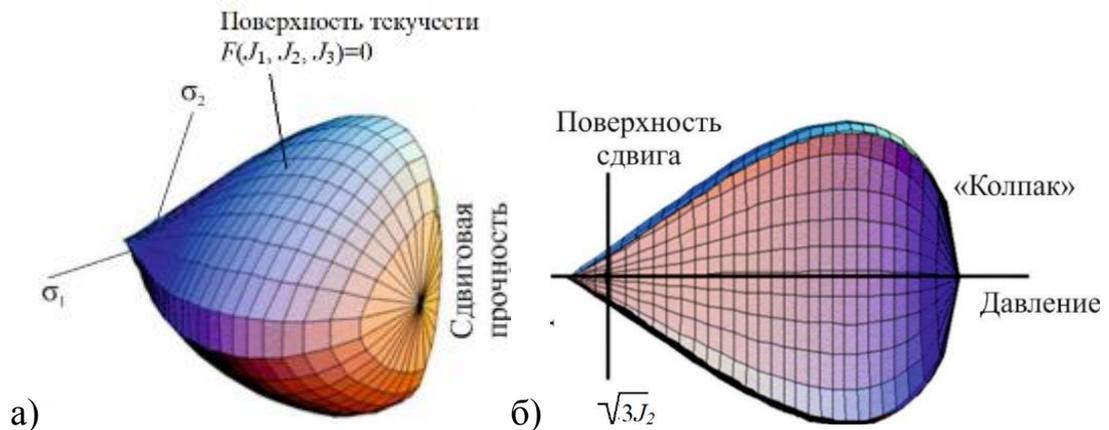


Рис. 2. – Поверхность текучести в пространстве главных напряжений:  
а – в трех измерениях; б – в меридиональной плоскости

Эта модель упругопластического повреждения с эффектами скорости широко используется для моделирования статического и динамического отклика бетонных конструкций [6 – 8].

Нелинейное поведение описывается с точки зрения теории пластического течения, зависящей от скорости деформации гладкой поверхностью текучести  $F(I_1, J_2, J_3)$ , состоящей из поверхности сдвига и поверхности колпачка (см. рис. 2) [9 – 11].

При моделировании бетона восьмигранными объемными элементами арматура моделируется стержневыми конечными элементами с

использованием упругопластической модели деформирования, что позволяет наиболее точно и адекватно описать работу исследуемой железобетонной конструкции.

### **Разрушение отдельно стоящей колонны при воздействии воздушной ударной волны**

Для повышения точности расчета, необходима верификация используемых методик, поэтому выполним сравнение с экспериментальными полевыми исследованиями, выполненными другими авторами [12], где в результате первого испытания на свободностоящую колонну воздействовал точечный взрыв (далее будем называть эксперимент №1), а во втором испытании колонна испытывала вертикальную нагрузку и также была подвержена взрывному воздействию и доведена до разрушения (эксперимент №2). Для этого выполним два численных расчета и сравним с результатами обоих экспериментов.

Для сравнения с результатами эксперимента №1, поместим в воздушную область рассмотренной выше расчетной модели на расстоянии 2,5м от взрывчатого вещества колонну высотой 3м. Колонна, жестко заземленная в основании, имеет размер сечения 300х300мм и зафиксирована в горизонтальном направлении вверху колонны. Вертикальное армирование выполнено в виде 4Ø25 арматуры класса А400. Поперечное армирование выполнено в виде арматурных хомутов Ø10 класса А240 с шагом 75мм на опорах и 200мм в середине пролета.

Для анализа чувствительности сетки выполним серию расчетов с измельчением конечно-элементной сетки железобетонной колонны при воздействии 84 кг взрывчатого вещества ТНТ. Для этого рассмотрим несколько вариантов колонны с размерами конечных элементов от 10 до 100мм. Схема расчетной модели с различными размерами сетки конечных элементов изображена на рис. 3.

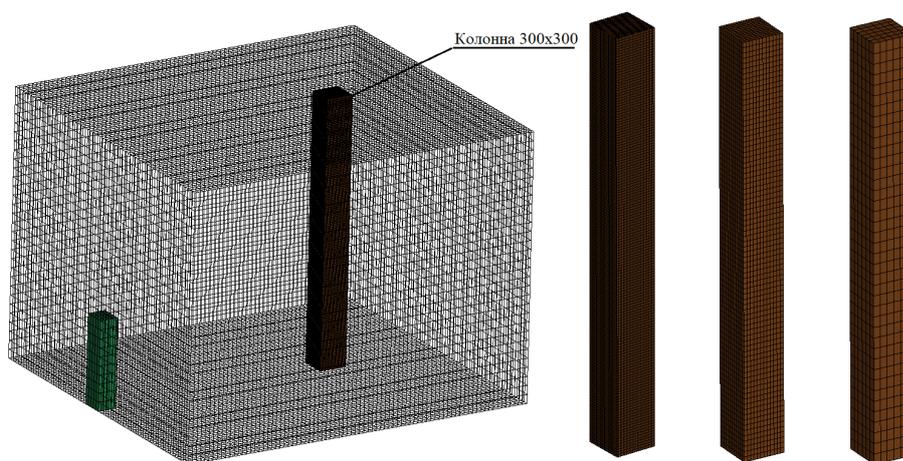


Рис. 3. – Схема расчетной модели

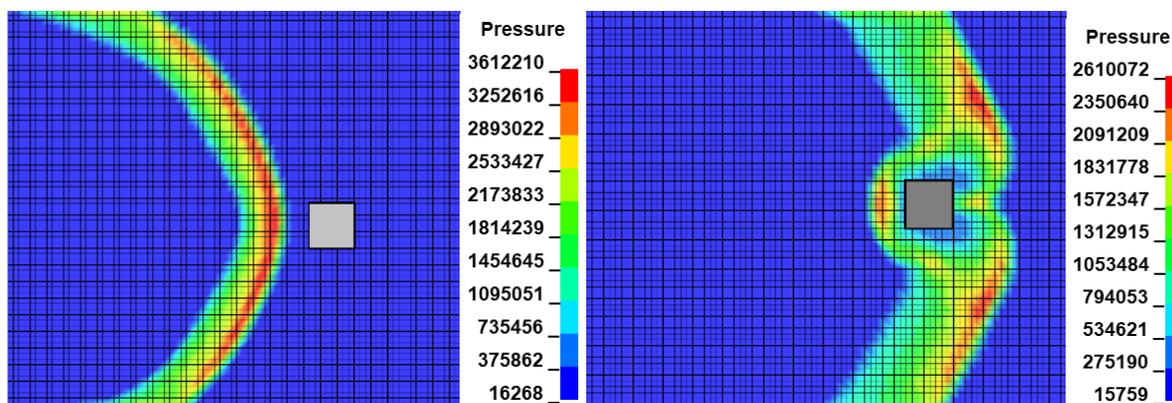


Рис.4. – Схема воздействия воздушной ударной волны на колонну

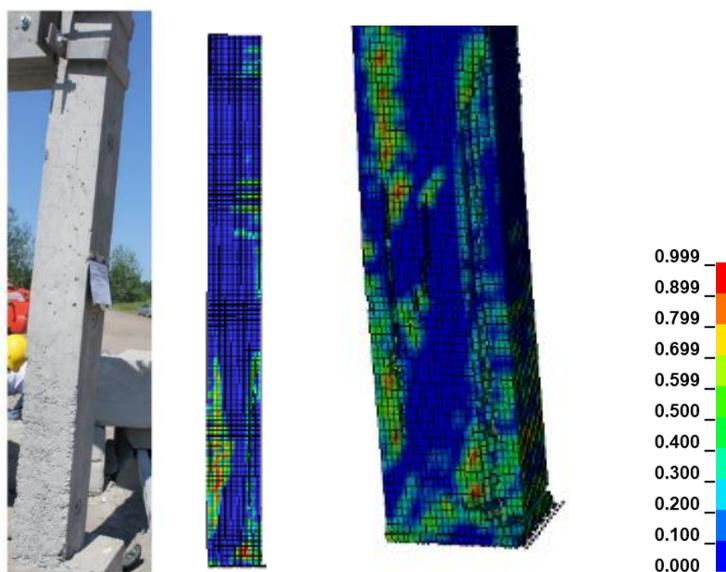


Рис.5. – Сравнение результатов численного моделирования колонны с сеткой КЭ 15x15мм с экспериментальной колонной

По результатам расчета получена картина взаимодействия воздушной ударной волны с колонной, на которой показан полный процесс нагружения и обтекания (рис. 4).

В результате расчета фиксировалось горизонтальное смещение колонны, которое для сетки КЭ с размером 15x15мм составило 26,5 мм, что имеет значение, наиболее близкое для экспериментальных значений смещения, составляющих 24,94мм (рис.5). Кроме того, при расчете с сеткой 15x15мм зафиксировано разрушение защитного слоя бетона в нижней части колонны, что также было выявлено при эксперименте.

Так как при постановке общей задачи предусмотрено полное или частичное разрушение конструкций, то продолжим сравнение нашего численного расчета с результатами полевого эксперимента, для этого, как и в эксперименте №2, доведем колонну до разрушения с помощью приложения осевой нагрузки и нагрузки от взрыва. При этом, для моделирования разрушившихся элементов используем DES-элементы.

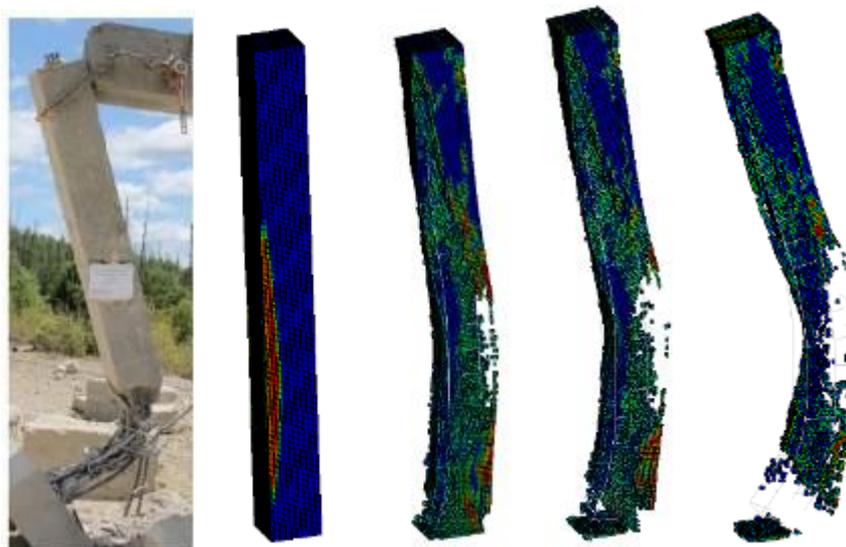


Рис.6. – Схема разрушения колонны

По выполненным численным исследованиям со сравнением результатов расчета с экспериментальными данными, полученными в полевых условиях, можно сделать вывод о том, что принятая методика

---

моделирования разрушений строительных конструкций с использованием газодинамического подхода в нелинейной динамической постановке дает наиболее близкие к полевым испытаниям результаты расчета.

### Расчет подземной части здания на воздействие воздушной ударной волны с учетом обрушения вышележащих конструкций

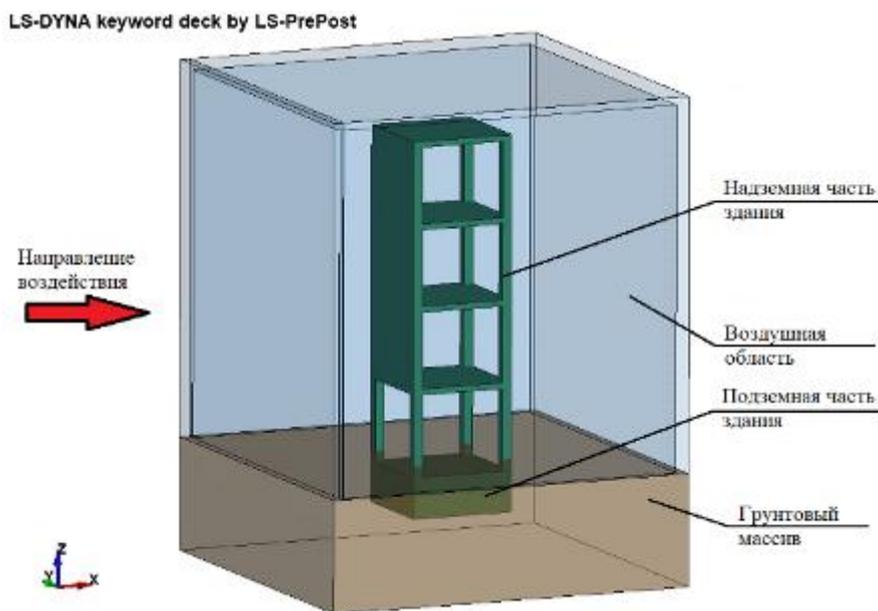


Рис. 7. – Расчетная модель здания

Для моделирования воздействия ударных волн на встроенное подземное сооружение с учетом разрушения надземной части и образования завала на его покрытии, была создана расчетная область, включающая грунтовую и воздушную часть. Внутри данной области помещено 4-х этажное однопролетное здание (рис. 7) с одноэтажной подземной частью. Конструктивная схема здания колонно-стенная. На границе расчетной области было задано воздействие воздушной ударной волны, с подходящим к сооружению с избыточным давлением во фронте в 100 кПа, и временем фазы сжатия - 0,25с.

На рис. 8 показан процесс взаимодействия (обтекания) воздушной ударной волны с сооружением, а на рис. 9 показано давление во фронте при воздействии на фронтальную стену и волна сжатия в грунте.

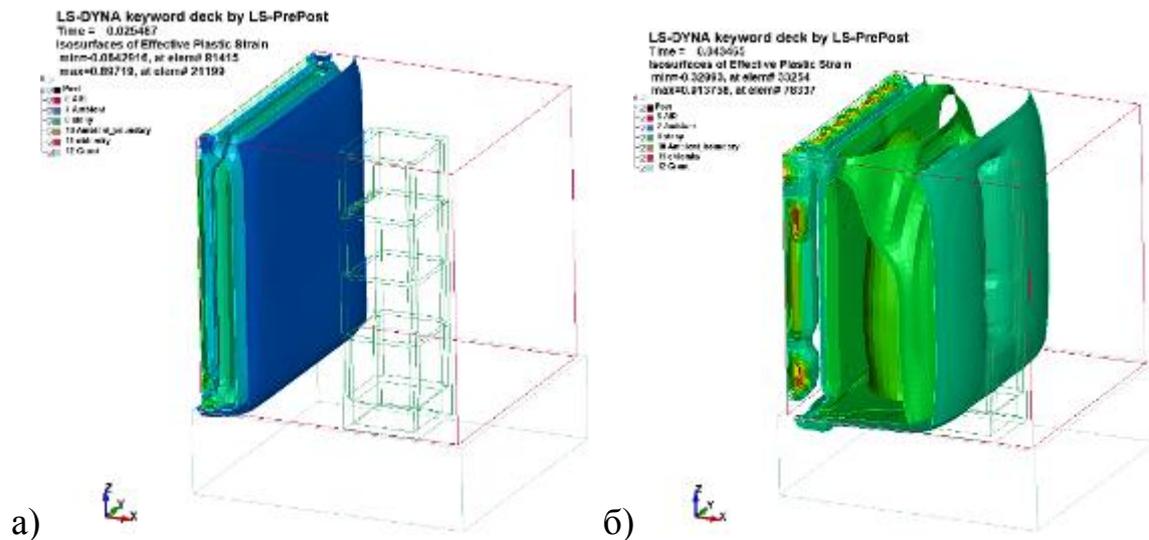


Рис. 8. – Процесс воздействия на здание: а) фронт волны на входе в расчетную область б) процесс обтекания здания воздушной ударной волной

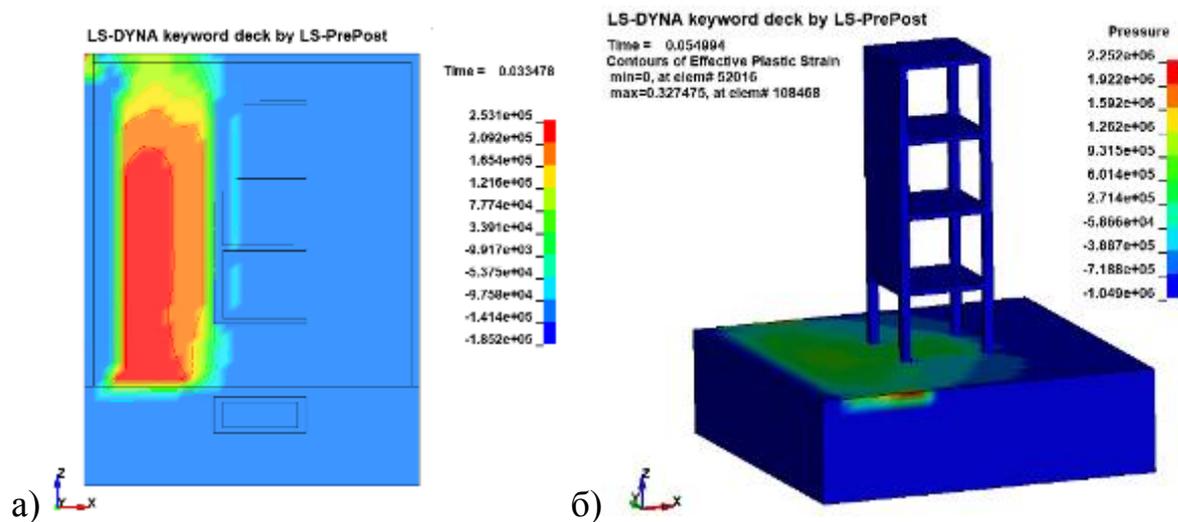


Рис. 9. – Давление во фронте подходящей к сооружению воздушной ударной волны (а), волны сжатия в грунте (б)

В результате расчета получена полная картина взаимодействия воздушной ударной волны с подземной и надземной частью здания с учетом падения разрушенных строительных конструкций и формированием завала на покрытии подземного сооружения (рис. 10). Также отмечается, что обрушение строительных конструкций происходит после окончания действия фазы сжатия и разряжения. Из этого можно сделать вывод о том, что при расчете на образовавшийся завал на покрытии подземной части,

необходимо учитывать установившееся напряженно-деформированное состояние покрытия подземной части, а также возможные дефекты и повреждения в нем после воздействия воздушной ударной волны и падения строительных конструкций.

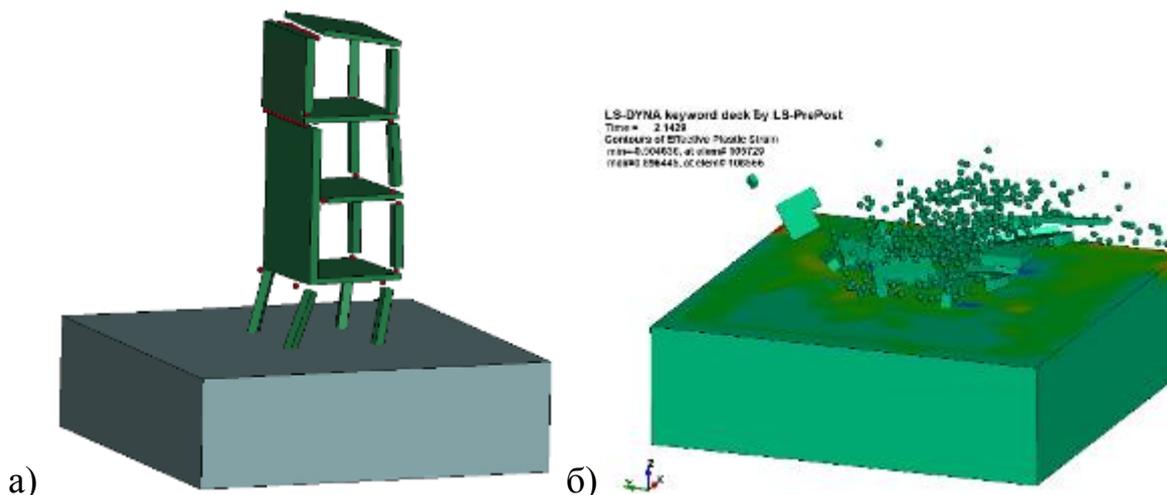


Рис. 10. – Процесс разрушения здания (а) и образование завала на покрытии подземного сооружения (б)

Кроме того, отмечается, что площадь образовавшегося завала превышает площадь покрытия подземной части в 1,5-2 раза, из чего можно сделать вывод о том, что данные нагрузки также необходимо учитывать для расположенных рядом других подземных сооружений, и защищенных коммуникаций.

**Выводы:** Выполнен расчет встроенного подземного сооружения на воздействие воздушной ударной волны с учетом обрушения надземной части здания. Результаты расчетов показывают, что разработанная методика, основанная на использовании газодинамического подхода в нелинейной динамической постановке, позволяет выполнять расчеты подземных сооружений на воздействие ударных волн более строго с учетом использования математических моделей грунтов и нелинейных моделей материалов, что, в целом, позволяет наиболее точно воспроизвести все

происходящие процессы взаимодействия и обрушения строительных конструкций при воздействии воздушных ударных волн.

### Литература

1. Бирбраер А.Н., Роледер А.Ю. Экстремальные воздействия на сооружения. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. 594 с.
  2. Котляреский В.А. Прочность и защитные свойства специальных сооружений. Методы расчета и программные средства. М.: 2014. 88 с.
  3. Зотова Е.В., Панасюк Л.Н. Численное моделирование динамических систем с большим числом степеней свободы на импульсные воздействия // Инженерный вестник Дона, 2012, № 3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1618](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1618)
  4. Савенков А.Ю., Мкртычев О.В. Нелинейный расчет железобетонного сооружения на воздействие воздушной ударной волны // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. Вып. 1. С. 33–45. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.1.33-45
  5. Mkrtychev O., Savenkov A. Modeling of blast effects on underground structure // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2019. Vol. 15. Issue 4. Pp. 111–122.
  6. Мкртычев, О.В., Андреев М.И. Численные исследования прочности бетонных цилиндров на сжатие // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2019. – Т.15. – № 6. – С. 433-437.
  7. Murray, Y., Abu-Odeh, A., Bligh, R. Evaluation of LS-DYNA Concrete Material Model 159. McLean, 2007. 206 p.
  8. Wei, J., Li, J., Wu, C. An experimental and numerical study of reinforced conventional concrete and ultra-high performance concrete columns under lateral impact loads. 2019. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109822. URL: [doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109822](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109822) (date accessed: 26.07.2020).
-

9. Weng, Y.-H., Qian, K., Fu, F., Fang, Q. Numerical investigation on load redistribution capacity of flat slab substructures to resist progressive collapse. *Journal of Building Engineering*. 2020. 29. Pp. 101109. DOI: 10.1016/j.jobe.2019.101109. URL: doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101109 (date accessed: 26.07.2020).

10. Saini, D., Shafei, B. Concrete constitutive models for low velocity impact simulations. 2019. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2019.103329. URL: doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2019.103329 (date accessed: 26.07.2020).

11. Levi-Hevroni, D., Kochavi, E., Kofman, B., Gruntman, S. Experimental and numerical investigation on the dynamic increase factor of tensile strength in concrete. 2017. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2017.12.006. URL: doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2017.12.006 (date accessed: 26.07.2020).

12. Farouk S. Experimental program conducted to test near-field blast loading on reinforced concrete columns. Masters Thesis in Progress, Civil Engineering Department, Carleton University, Ottawa. 2013. 155c.

### References

1. Birbraer A.N., Roleder A.Y. *Ekstremal'nyye vozdeystviya na sooruzheniya* [Extreme actions on structures]. Saint Petersburg: Polytechpress. 2009. 594 p.

2. Kotlyarevsky V. *Prochnost-i-zashhitnye-svoystva-spetsialnyh-sooruzhenij* [Strength and protective properties of special structures]. Magnitogorsk: VELD. 2014. 88 p.

3. Zotova Ye.V., Panasyuk L.N. *Inzhenernyj vestnik Dona*. 2012. № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1618

4. Savenkov A.Y., Mkrtychev O.V. *Vestnik MGSU*. 2019. Vol 14. No. 1, pp. 33–45. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.1.33-45

5. Mkrtychev O., Savenkov A. *Mezhdunarodnyy zhurnal po raschetu grazhdanskikh i stroitel'nykh konstruktsiy*. 2019. Vol. 15. Issue 4. Pp. 111–122.

---



6. Mkrtichev O., Andreev M. Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruktsiy i sooruzheniy. 2019. Vol.15. Pp. 433-437 DOI: 10.22363/1815-5235-2019-15-6-433-437.
7. Murray, Y., Abu-Odeh, A., Bligh, R. Design. McLean, 2007. 206 p.
8. Wei, J., Li, J., Wu, C. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109822. URL: doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109822 (date accessed: 26.07.2020).
9. Weng, Y.-H., Qian, K., Fu, F., Fang, Q. Zhurnal stroitel'noy inzhenerii. 2020. 29. Pp. 101109. DOI: 10.1016/j.jobe.2019.101109. URL: doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101109 (date accessed: 26.07.2020).
10. Saini, D., Shafei, B. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2019.103329. URL: doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2019.103329 (date accessed: 26.07.2020).
11. Levi-Hevroni, D., Kochavi, E., Kofman, B., Gruntman, S. 2017. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2017.12.006. URL: doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2017.12.006
12. Farouk S. Experimental program conducted to test near-field blast loading on reinforced concrete columns. Masters Thesis in Progress, Civil Engineering Department, Carleton University, Ottawa. 2013. 155 p.