

ДИНАМИКА КОНСТРУКЦИЙ И СООРУЖЕНИЙ DYNAMICS OF STRUCTURES AND BUILDINGS

DOI 10.22363/1815-5235-2021-17-4-425-438
УДК 624.046

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH ARTICLE

Воздействие тяжелого предмета на подземное сооружение при падении на поверхность грунта

О.В. Мкртычев¹, Ю.В. Новожилов², А.Ю. Савенков¹

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Российская Федерация

²АО «КАДФЕМ Си-Ай-Эс», Москва, Российская Федерация

✉ savenkov.asp@mail.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 14 апреля 2021 г.

Доработана: 4 июля 2021 г.

Принята к публикации: 22 июля 2021 г.

Аннотация. На объектах космической инфраструктуры и на объектах атомной энергетики есть промышленные сооружения, основной задачей которых является уберечь человека, оборудование или технику от чрезвычайных ситуаций, таких как взрывы, падения различных предметов, осколков. В соответствии с требованиями Федерального закона РФ «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» при расчете таких сооружений должны учитываться все виды нагрузок, соответствующих их функциональному назначению. Так, для сооружений, находящихся в районе возможной аварии и падения космических ракет необходимо выполнять расчет на падение разрушившихся частей ракетного двигателя. Для объектов атомных электростанций такие аварии случаются при падении на грунт контейнеров и других тяжелых предметов, что воздействует на находящиеся в грунте подземные сооружения. Для защитных сооружений гражданской обороны, встроенных в подвальные этажи зданий необходимо рассматривать ситуации, при которых происходит обрушение вышележащих этажей здания при воздействии на них воздушной ударной волны. Разработана конечно-элементная методика расчета подземного сооружения в нелинейной динамической постановке при соударении с грунтом большого габаритного предмета.

Ключевые слова: нелинейный динамический расчет, падение ударника, атомные электростанции, объекты космической инфраструктуры, подземное сооружение, аварийные воздействия, метод конечных элементов, LS-DYNA

Для цитирования

Мкртычев О.В., Новожилов Ю.В., Савенков А.Ю. Воздействие тяжелого предмета на подземное сооружение при падении на поверхность грунта // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2021. Т. 17. № 4. С. 425–438. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2021-17-4-425-438>

Мкртычев Олег Вартанович, доктор технических наук, профессор кафедры сопротивления материалов, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Российская Федерация, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 0000-0002-2828-3693, Scopus Author ID: 56449249100, eLIBRARY SPIN-код: 9676-4986; mkrtychev@yandex.ru

Новожилов Юрий Владиславович, руководитель направления НРС и высоколинейных расчетов, АО «КАДФЕМ Си-Ай-Эс», Российская Федерация, 111672, Москва, ул. Суздальская, д. 46; yury.novozhilov@cadfem-cis.ru

Савенков Антон Юрьевич, аспирант, кафедра сопротивления материалов, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Российская Федерация, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26; eLIBRARY SPIN-код: 8652-8088; savenkov.asp@mail.ru

© Мкртычев О.В., Новожилов Ю.В., Савенков А.Ю., 2021



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

The impact of heavy object on an underground structure when falling onto the ground surface

Oleg V. Mkrtychev¹, Yury V. Novozhilov², Anton Yu. Savenkov¹

¹Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

²CADFEM CIS, Moscow, Russian Federation

✉ savenkov.asp@mail.ru

Article history

Received: April 14, 2021

Revised: July 3, 2021

Accepted: July 22, 2021

For citation

Mkrtychev O.V., Novozhilov Yu.V., Savenkov A.Yu. The impact of heavy object on an underground structure when falling onto the ground surface. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2021;17(4):425–438. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2021-17-4-425-438>

Abstract. At the objects of space infrastructure and at nuclear power facilities there are industrial structures, the main task of which is to protect a person, equipment or machinery from emergencies such as, for example, explosions, falling of various objects, fragments. In accordance with the requirements of the Federal Law “On the Protection of the Population and Territories from Natural and Technogenic Emergencies”, when calculating such structures, all types of loads corresponding to their functional purpose must be taken into account. So, for structures located in the area of a possible accident and the fall of space rockets, it is necessary to calculate for the fall of the destroyed parts of the rocket engine. For nuclear power plant facilities, such accidents occur when containers and other heavy objects fall on the ground, affecting underground structures located in the ground, and for civil defense protective structures built into the basement floors of buildings, it is necessary to consider situations in which the overlying floors of a building collapse when exposed to there is an air shock wave on them. Therefore, this problem is relevant, and in this study, a finite-element method for calculating an underground structure in a non-linear dynamic setting has been developed when a large overall object collides with the ground.

Keywords: nonlinear dynamic calculation, falling objects, nuclear power plants, space infrastructure objects, underground structure, emergency impacts, finite element method, LS-DYNA

Введение

В практике эксплуатации подземных сооружений случаются аварийные ситуации, при которых происходит падение на них тяжелых предметов. Такие ситуации могут происходить, например, на космодромах при аварийном запуске ракеты. Так, в 2002 г. произошла авария на космодроме Плесецк, при которой стартовый стол и соседние сооружения получили значительные повреждения, в том числе от падения сопла ракетного двигателя, которое, падая, пробило покрытие стартового стола. В связи с этим при расчете подземных сооружений, предназначенных для защиты людей и оборудования, рассматривается расчетная ситуация, при которой происходит падение сопла разгонного блока ракеты на космодромах.

Задача о высокоскоростных импульсных воздействиях на строительные конструкции является достаточно изученной, в том числе в военной сфере. Некоторые результаты таких исследований приведены в [1–5]. В настоящее время продолжают совершенствоваться данные исследования и разработка методик расчета на высокоскоростные импульсные воздействия [6–14], чему способствует развитие расчетных комплексов.

В исследовании рассматривается динамическое воздействие тяжелого габаритного предмета на находящееся в грунте сооружение. *Целью* исследования является разработка конечно-элементной модели подземного сооружения при падении на поверхность земли жесткого ударника.

Oleg V. Mkrtychev, Dr Sci. (Eng.), Professor of the Strength of Materials Department, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), 26 Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-2828-3693, Scopus Author ID: 56449249100, eLIBRARY SPIN-code: 9676-4986, mkrtychev@yandex.ru

Yury V. Novozhilov, Explicit Dynamics Expert and Head of High Performance Computing Department, 46 Suzdalskaya St, Moscow, 111672, Russian Federation; yury.novozhilov@cadfem-cis.ru

Anton Yu. Savenkov, postgraduate student, Strength of Materials Department, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), 26 Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 8652-8088; savenkov.asp@mail.ru

Для решения поставленной цели реализованы следующие задачи:

– создана расчетная модель падения полусферы на грунт, результаты сравнены с данными других исследований;

– разработана конечно-элементная модель подземного сооружения при падении на поверхность земли жесткого ударника.

Материалы и методы моделирования

Процесс высокоскоростного взаимодействия тел описывается дифференциальными уравнениями в частных производных. Для решения данных уравнений часто на практике используется метод конечных элементов (МКЭ), заключающийся в делении расчетной области на конечные элементы (КЭ). Данный процесс называется дискретизацией, и для подобных быстропротекающих задач выполняется как пространственная, так и временная дискретизация.

Так как удар по грунту имеет высоконелинейный характер, то оптимальным является применение явного метода моделирования. При данном методе система алгебраических уравнений, полученных путем приведения дифференциальных уравнений к алгебраической системе относительно перемещений в узлах, решается напрямую, то есть явно. Это позволяет решать задачи с быстропротекающими процессами в нелинейной постановке.

Дифференциальное уравнение движения системы с конечным числом степеней свободы при явном методе записывается следующим образом:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = f^a. \quad (1)$$

Для явной схемы выглядит так

$$M\ddot{u}_t + C\dot{u}_t + Ku_t = f_t^a. \quad (2)$$

Вектор ускорений

$$a_t = M^{-1}(f_t^{\text{ext}} - f_t^{\text{int}}), \quad (3)$$

где f_t^{ext} – вектор внешних сил; f_t^{int} – вектор внутренних сил.

Учет различных типов нелинейностей производится через вектор внутренних сил $\{F\}$:

$$f_t^{\text{int}} = \Sigma \left(\int_{\Omega} [B^T] \{\sigma\} d\Omega + \{F^{\text{cont}}\} \right), \quad (4)$$

где B – матрица деформаций – перемещений; σ – вектор перемещений; F^{cont} – вектор контактных сил.

Векторы скоростей и перемещений на соответствующем шаге определяются следующим образом:

$$v_{t+\Delta t/2} = v_{t-\Delta t/2} + a_t \Delta t; \quad (5)$$

$$u_{t+\Delta t} = u_t + v_{t+\Delta t/2} \frac{\Delta t_t + \Delta t_{t+\Delta t}}{2}. \quad (6)$$

Для стабильности счета в явном методе необходимо выполнение условия Куранта – Фридриха – Леви, при котором шаг по времени должен быть меньше, чем продолжительность прохождения звука по наименьшему элементу. Это условия записывается следующим образом:

$$0 \leq \Delta t \leq N \frac{l}{c}, \quad (7)$$

где N – коэффициент безопасности; l – размер наименьшего элемента; c – скорость звука в элементе.

Для решения задачи пространственной дискретизации расчетной модели используются лагранжев и эйлеров методы, которые различаются в подходе к описанию движению среды.

Лагранжев метод используется в МКЭ. В этом методе описания движения среды элементы при деформации движутся вместе со своим материалом. При этом нет перетекания материала от одного к другому, то есть нет конвективных процессов. Такой метод подходит для описания твердых элементов. Однако при больших деформациях может произойти значительное искажение сетки КЭ, что может привести к очень маленьким временным шагам и спутыванию сетки (рис. 1).

Эйлеров метод (рис. 2) используется в методе конечных разностей и методе конечных объемов. В этом методе, в отличие от предыдущего, сетка остается недеформированной, в то время как материал может перетекать из одного элемента в другой (рис. 9). Такой метод подходит для жидких материалов, таких как газ или вода, а в нашем случае и к грунтам, потому что они при высокоскоростном проникновении проявляют свойства этих материалов.



Рис. 1. Лагранжево описание движения сред
Figure 1. Lagrangian description of the motion of a continuous medium

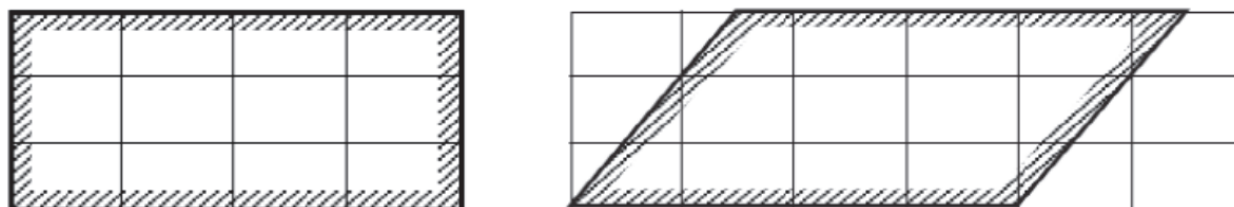


Рис. 2. Эйлерово описание движения сред
Figure 2. Euler description of the motion of a continuous medium

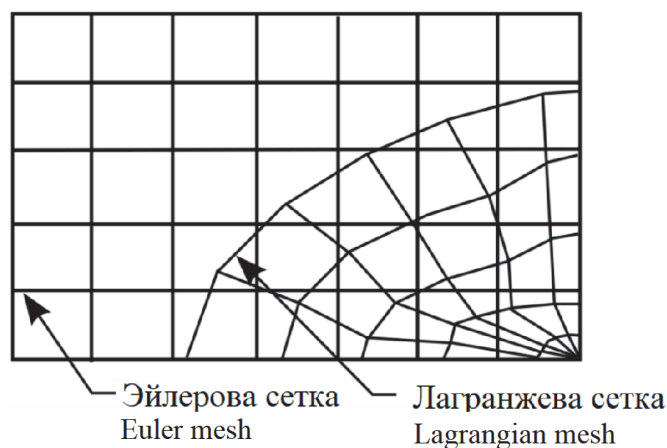


Рис. 3. Лагранжево-эйлерово описание движения сред
Figure 3. Lagrangian- Eulerian description of the motion of a continuous medium

Обозначенные методы имеют свои достоинства и недостатки, поэтому на практике для решения высокоскоростных задач взаимодействия твердых тел и жидких материалов (fluid-structure interactions, FSI) применяются совместно оба метода (рис. 3), дополняющие друг друга (arbitrary Lagrangian Eulerian, ALE). При этом происходит автоматическая перестройка и сглаживание конечно-элементной сетки при вырождении элементов. Примерами таких задач могут быть поверхностные взрывы (плоский фронт волны), где воздух является эйлеровым, а грунт и сооружение лагранжевыми. Или при подземных и наземных взрывах (точечный взрыв на поверхности), когда воздух и грунт эйлеровы, а сооружение лагранжево.

Кроме основного решателя ALE, используется его модифицированная версия S-ALE, позволяющая описывать конечные элементы эйлеровой сетки в виде массива, что на порядок сокращает объем входного файла и облегчает построение и перестроение эйлеровой сетки, по сравнению с неструктурированным подходом, что в совокупности значительно сокращает время расчета и моделирования.

Для решения поставленных задач будем использовать программный комплекс LS-DYNA, позволяющий решать подобные задачи в нелинейной динамической постановке, с использованием метода центральных разностей [15–17]. Для аппроксимации уравнений LS-DYNA использует метод Годунова второго порядка точности по пространству. Интегрирование уравнений по времени осуществлялось с помощью явной схемы второго порядка точности (метод центральных разностей) с соблюдением условия устойчивости схемы по критерию Куранта.

Граничные условия. На границах расчетной области в качестве граничных условий приложены условия скольжения, при которых зануляются векторы скорости в нормальном направлении, что позволяет моделировать неотражающие границы расчетной области и тем самым не учитывать вторичное отражение волн от грунта с последующим воздействием их на сооружение. Хотя в случае нахождения под сооружением скального грунта все же надо учитывать данные эффекты.

Модель грунта. Дисперсные грунты неоднородны, анизотропны, имеют нелинейные зависимости между напряжениями и деформациями и, как правило, при численном моделировании зависимость между напряжениями и деформациями идеализируют. В [18–24] показано, что модель Мора – Кулона – это идеальная-упругопластическая модель линейно деформируемого пространства, в которой описываются поля деформаций и используется условие прочности Кулона для предельного состояния, при этом отмечается, что такая модель может быть применима для задач высокоскоростного воздействия на грунт.

Модель Мора – Кулона – это математическая модель, в основе которой лежит гипотеза о зависимости предельных касательных напряжений от среднего нормального напряжения, которая обусловлена внутренним трением в материале.

Классическая модель Мора – Кулона описывается следующими условиями прочности, которые имеют различный вид при разных условиях испытаний. Первое условие прочности:

$$\tau = \sigma_v \operatorname{tg} \varphi' + c' \quad (8)$$

– консолидировано-дренированный сдвиг;

$$\tau = (\sigma_v - u) \operatorname{tg} \varphi + c \quad (9)$$

– консолидированно-недренированный сдвиг;

$$\tau = c_u \quad (10)$$

– неконсолидированно-недренированный сдвиг (для водонасыщенных грунтов);

$$\tau = (u_a - u) \operatorname{tg} \varphi^b + (\sigma_v - u) \operatorname{tg} \varphi' + c' \quad (11)$$

– консолидированно-недренированный сдвиг, малоподвижные грунты;

$$\tau = \sigma_v \operatorname{tg} \varphi_r' + c_r' \quad (12)$$

– в случае больших деформаций сдвига,

где τ – касательное напряжение, при достижении которого будет происходить разрушение грунта; σ_v – эффективное нормальное напряжение; φ' – эффективный угол внутреннего трения; φ – дренированный угол внутреннего трения; c – дренированные силы удельного сцепления; c' – эффективные силы удельного сцепления; u_a – давление порового воздуха; u – давление поровой воды; φ^b – угол внутреннего трения, зависящий от величины матричного всасывания; φ_r' – остаточный угол внутреннего трения; c_r' – остаточные силы удельного сцепления; c_u – недренированная прочность.

Второе условие прочности:

$$\sin \varphi = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} \quad (13)$$

– для гравелистых, песчаных и крупнообломочных грунтов;

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{(\sigma_1 + \sigma_3 + 2c \operatorname{ctg} \varphi)} = \sin \varphi \quad (14)$$

– для глинистых грунтов.

Уравнение при трехмерном напряженно-деформируемом состоянии примет вид

$$\left. \begin{aligned} |\sigma_1 - \sigma_2| &= (2c \operatorname{ctg} \varphi - \sigma_1 - \sigma_2) \sin \varphi, \\ |\sigma_2 - \sigma_3| &= (2c \operatorname{ctg} \varphi - \sigma_2 - \sigma_3) \sin \varphi, \\ |\sigma_3 - \sigma_1| &= (2c \operatorname{ctg} \varphi - \sigma_3 - \sigma_1) \sin \varphi. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Согласно этому уравнению, поверхность текучести Мора – Кулона в пространстве главных напряжений имеет вид шестигранной пирамиды (рис. 4) с вершиной в точке с координатами $\{c \operatorname{ctg} \varphi; c \operatorname{ctg} \varphi; c \operatorname{ctg} \varphi\}$.

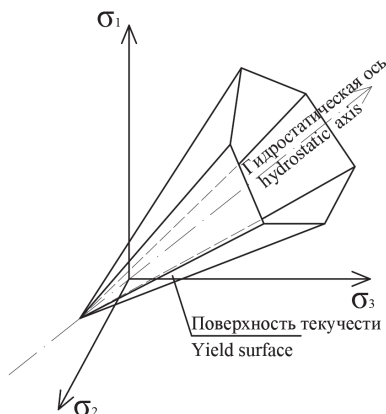


Рис. 4. Поверхность текучести Мора – Кулона в пространстве главных напряжений
Figure 4. Mohr – Coulomb yield surface in the space of principal stresses

На рис. 5 приведены предельные огибающие Мора – Кулона, которые могут быть получены по результатам трехосных испытаний образцов грунта.

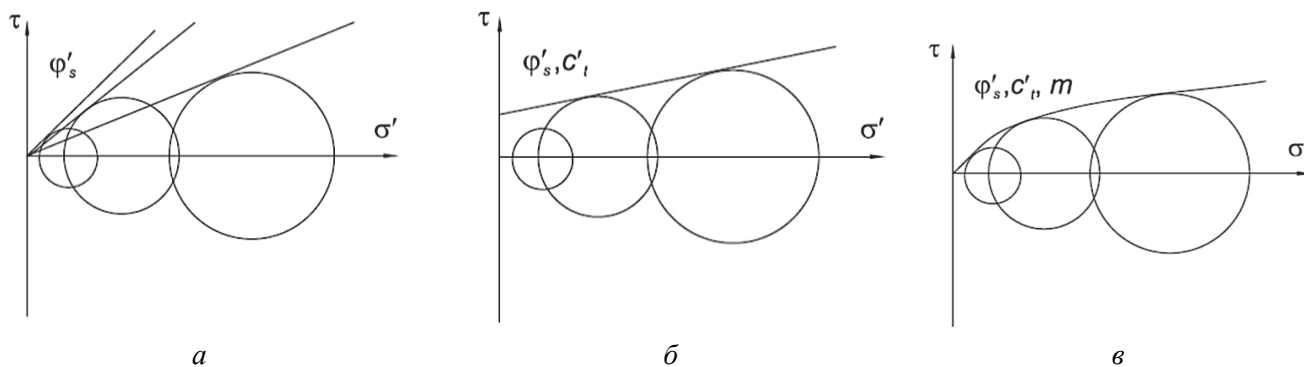


Рис. 5. Предельные огибающие Мора – Кулона:
 а – секущий угол внутреннего трения; б – касательный угол внутреннего трения;
 в – угол внутреннего трения, который зависит от угла наклона предельной огибающей

Figure 5. Mohr – Coulomb limit envelopes:
 а – internal friction secant angle; б – internal friction tangent angle;
 в – the angle of internal friction, which depends on the angle of inclination of the limiting envelope

Вид огибающей, представленный на рис. 5, в, соответствует виду грунта, для которого характерно определение прочности только трением. Такой грунт является фрикционным материалом (например, песок). В этом случае условие прочности для каждого напряженного состояния будет иметь вид

$$\tau = \sigma' \operatorname{tg} \varphi_s, \quad (16)$$

где φ_s – секущий угол внутреннего трения; σ' – эффективное нормальное напряжение.

Условие прочности (8) соответствует изображению, приведенному на рис. 5, б. В данном случае предельная прямая является наилучшей касательной к кругам Мора. Однако в общем случае провести такую касательную к кругам затруднительно, так как зависимость между нормальным давлением и пределом прочности является существенно нелинейной. Тогда на отдельных участках предельная кривая аппроксимируется прямой, а на остальных заменяется огибающей к кругам Мора.

Как видно, данная модель описывает различные виды грунтов при различном водонасыщении. Кроме классической модели существуют ее модификации, используемые для отдельных специфических задач. Например, для задач взрыва зарекомендовала себя модель Мора – Кулона, основанная на работах A.J. Abbo and S.W. Sloan, выполненных в 1995 г. [25], учитывающая все перечисленные выше поведения грунтов, а также удаление элементов, что характерно при взрывных нагрузках [26; 27]. Поэтому именно эту версию модели Мора – Кулона и будем использовать.

Обычная поверхность текучести Мора – Кулона описывается функцией

$$F = -P \sin \varphi + K(\theta) \sqrt{J_2} - c \cos \varphi = 0, \quad (17)$$

где P – среднее давление; φ – угол внутреннего трения; $K(\theta)$ – функция угла θ в девиаторной плоскости; $\sqrt{J_2}$ – корень квадратный из второго инварианта девиатора напряжений; c – сцепление.

Модифицированная поверхность текучести является гиперболоидом, «подогнанным» к поверхности Мора – Кулона. Уравнение модифицированной поверхности имеет вид

$$F = -P \sin \varphi + \sqrt{J_2 K(\theta)^2 + a^2 \sin^2 \varphi} - c \cos \varphi = 0, \quad (18)$$

где a – параметр, определяющий приближение модифицированной поверхности к обычной поверхности Мора – Кулона.

Модель бетона и арматуры. Моделирование бетона принято с помощью восьмиузловых конечных элементов с полным интегрированием по объему. Используется модель бетона Уинфрита, учитывающая дополнительные эффекты скорости, а также наличие трещин и арматуры [7; 27; 28]. Прочность материала на сжатие принята 18,0 МПа, что соответствует классу бетона по прочности В25¹. Арматура моделируется стержневыми конечными элементами с использованием идеальной упругопластической модели материала с ограничением пластических деформаций $\epsilon_{пред}$. Диаграмма работы арматуры класса А500 и А240 принималась двухлинейной². Для взаимодействия объемных (бетон) и стержневых (арматура) конечных элементов используется механизм лагранжево-эйлеровых связей. Прочность арматуры принята нормативной. Предельная пластическая деформация, при которой элемент арматуры выключается из расчета (удаляется), принята равной $\epsilon_{пр} = 0,05$. Таким образом, $\epsilon_{пред} = 0,0525$. Прочность на растяжение и сжатие принимается одинаковой, равной нормативной прочности на растяжение в соответствии с отечественными нормами³.

Сравнительный анализ с существующими исследованиями

Рассмотрим задачу о падении жесткой полусферы диаметром 0,66 м со скоростью 40 м/с в грунтовой массив размером 3×3×3 м (рис. 7) и сравним с результатами, приведенными в [21] (далее – эксперимент), где была численно и экспериментально решена подобная задача. Грунт рассматривался с параметрами, указанными в табл. 1. Для этого решим данную задачу в ALE, S-ALE и лагранжевой постановках, где исходными данными являются скорость полусферы в момент соударения с грунтом и давление от собственного веса грунта (рис. 8).

Таблица 1

Table 1

Параметры грунта		Soil parameters	
Параметр	Значение	Parameter	Value
Плотность	2200 кг/м ³	Density	2200 kg/m ³
Модуль сдвига	1,53 МПа	Shear modulus	1,53 МПа
Коэффициент Пуассона	0,35	Poisson's ratio	0,35
Угол внутреннего трения	150	Internal friction angle	150
Сцепление	68 кПа	Adhesion	68 kPa

¹ СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения».

² Там же.

³ Там же.

Ударник моделировался как жесткое тело из алюминия с параметрами, указанными в табл. 2.

Таблица 2

Table 2

Параметры алюминиевого ударника

Параметр	Значение
Плотность	2812 кг/м ³
Модуль упругости	73 000 МПа
Коэффициент Пуассона	0,33

Parameters of the aluminum striker

Parameter	Value
Density	2812 kg/m ³
Elastic modulus	73 000 MPa
Poisson's ratio	0.33

Точность решения в МКЭ зависит от размеров конечных элементов, поэтому выполнялась серия расчетов с последовательным измельчением размеров конечного элемента от 5 до 3 см через каждые 0,5 см, до того момента, пока разница в результатах расчета схемы между наиболее мелкой сеткой и предыдущим размером сетки составит не более 5 %. На рис. 6 приведены графики давления во времени, измеренные на глубине 1,5 м при расчете в трех постановках и при различных размерах конечного элемента.

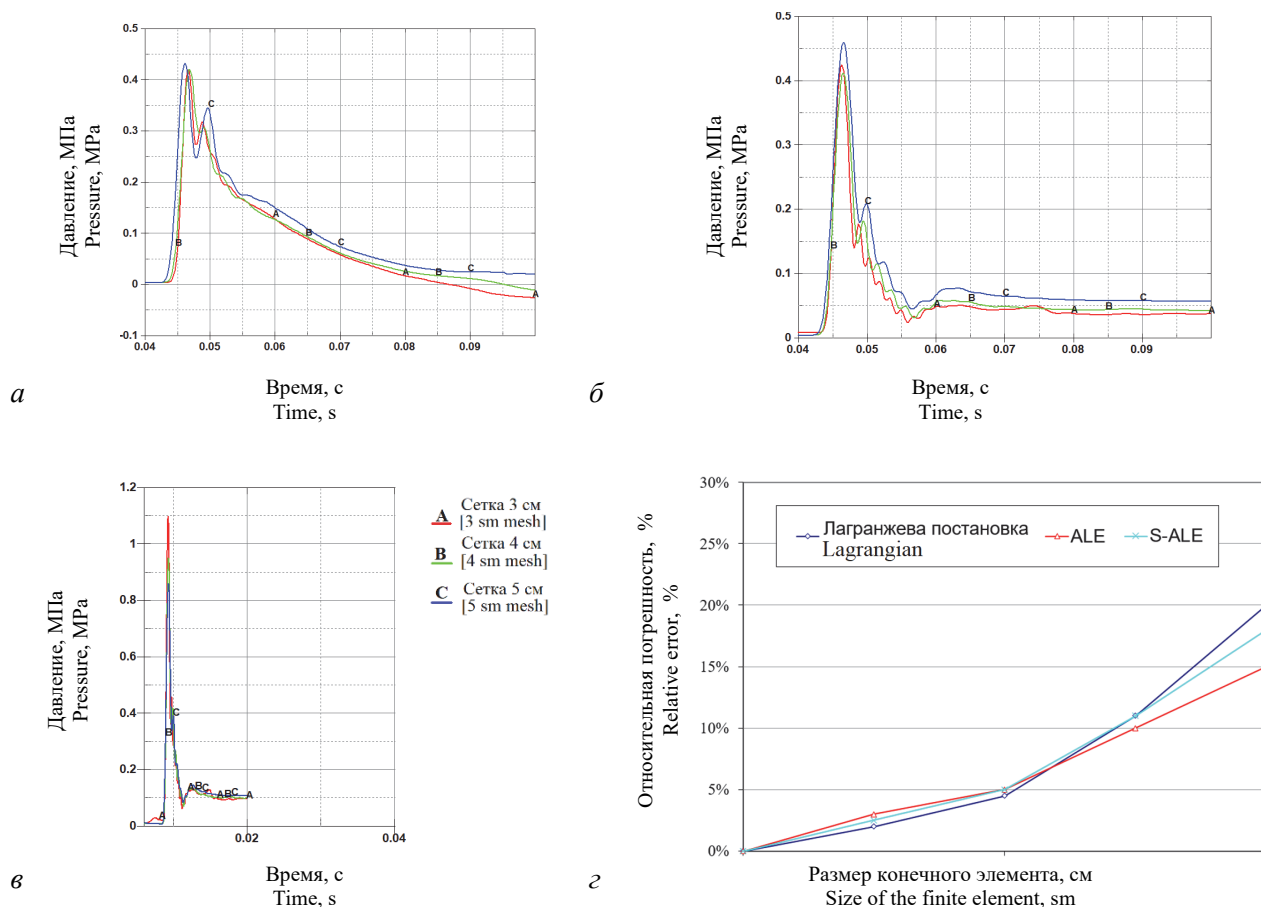


Рис. 6. Результаты расчета давления на глубине 1,5 м:
 а – ALE постановка; б – S-ALE постановка; в – Лагранжева постановка;
 з – зависимость относительной погрешности от размера конечного элемента

Figure 6. The results of calculating pressure at a depth of 1.5 m:
 а – ALE; б – S-ALE; в – Lagrangian; з – dependence of the relative error on the size of the finite element

На рис. 6, з показан график зависимости погрешности значений пикового давления относительно наиболее мелкой сетки в 3 см, где показано, что сетка в 4 см является наиболее оптимальной с погрешностью не более 5 %.

В качестве результатов расчета в работе [21] был приведен график ускорения полусферы при ударе о грунт, где максимальное ускорение полусферы составило 12 643 м/с² (рис. 10).

В результате решения задачи в трех постановках можно увидеть, что графики ускорения полусферы (рис. 10) в ALE- и S-ALE-постановках оказались наиболее близкими к экспериментальному графику по

форме и по максимальному значению ускорения. Максимальное ускорение полусферы составило 12 700 и 12 680 м/с², то есть относительная погрешность составила 0,43 и 0,25 % соответственно. При решении задачи в лагранжевой постановке максимальное ускорение составило 18 710 м/с², то есть относительная погрешность составила 67 %, что произошло в результате значительного искажения сетки (рис. 9, в). При этом также сравнивалось время расчета. При решении задачи в ALE-постановке время расчета оказалось равным 60 мин, в S-ALE-постановке – 45 мин, в лагранжевой постановке – 25 мин (расчет выполнялся на процессоре Intel(R) Core(TM) i7-10750H CPU @ 2.6 GHz, 2592МГ, 6 ядер, 12 логических процессоров).

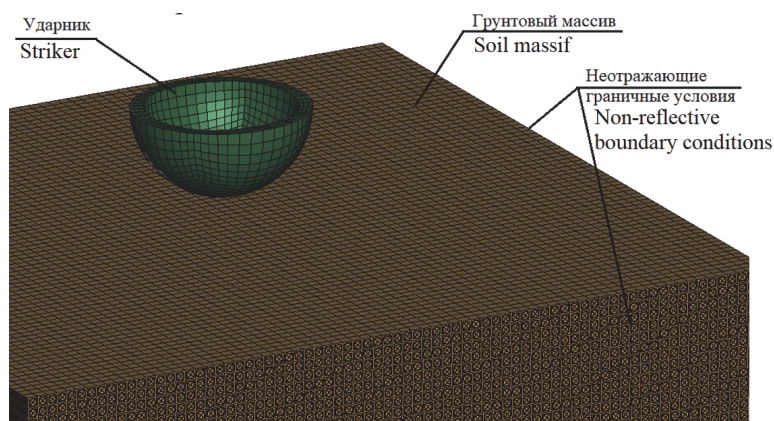


Рис. 7. Расчетная модель
Figure 7. Calculation model

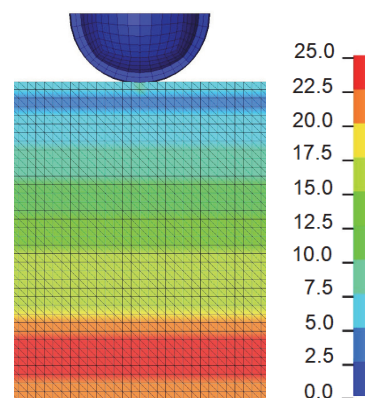


Рис. 8. Давление от собственного веса грунта, кПа
Figure 8. Pressure from dead weight of soil, kPa

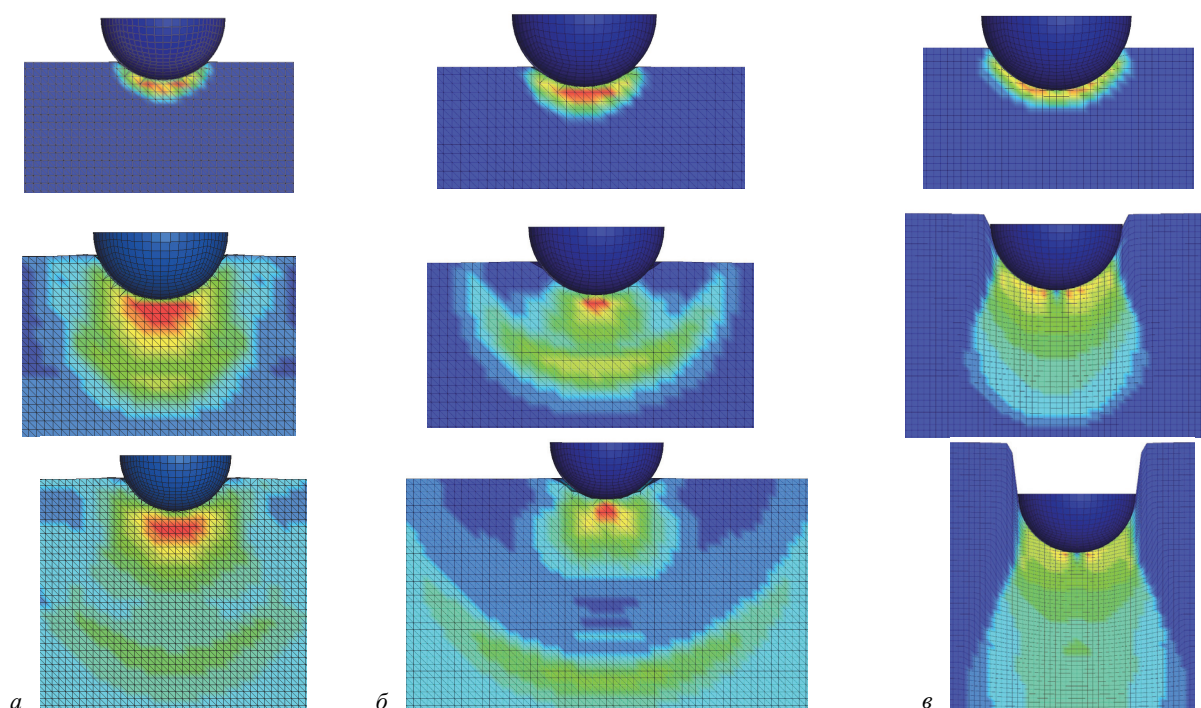


Рис. 9. Распространение ударной волны в грунте при решении задачи в ALE (а), S-ALE (б), лагранжевой (в) постановках
Figure 9. Propagation of a shock wave in the soil when solving the problem ALE (a), S-ALE (б), lagrangian (в)

Из приведенных результатов расчета (рис. 9) можно сделать вывод, что методика расчета в S-ALE-постановке дает наиболее близкие к эксперименту результаты расчета по максимальному пиковому значению ускорения. Кроме того, дает более точные результаты при описании первичных и вторичных пиков (рис. 9, а) и занимает меньше машинного времени для моделирования и расчета, чем в ALE. Поэтому в дальнейшем будем использовать именно эту методику.

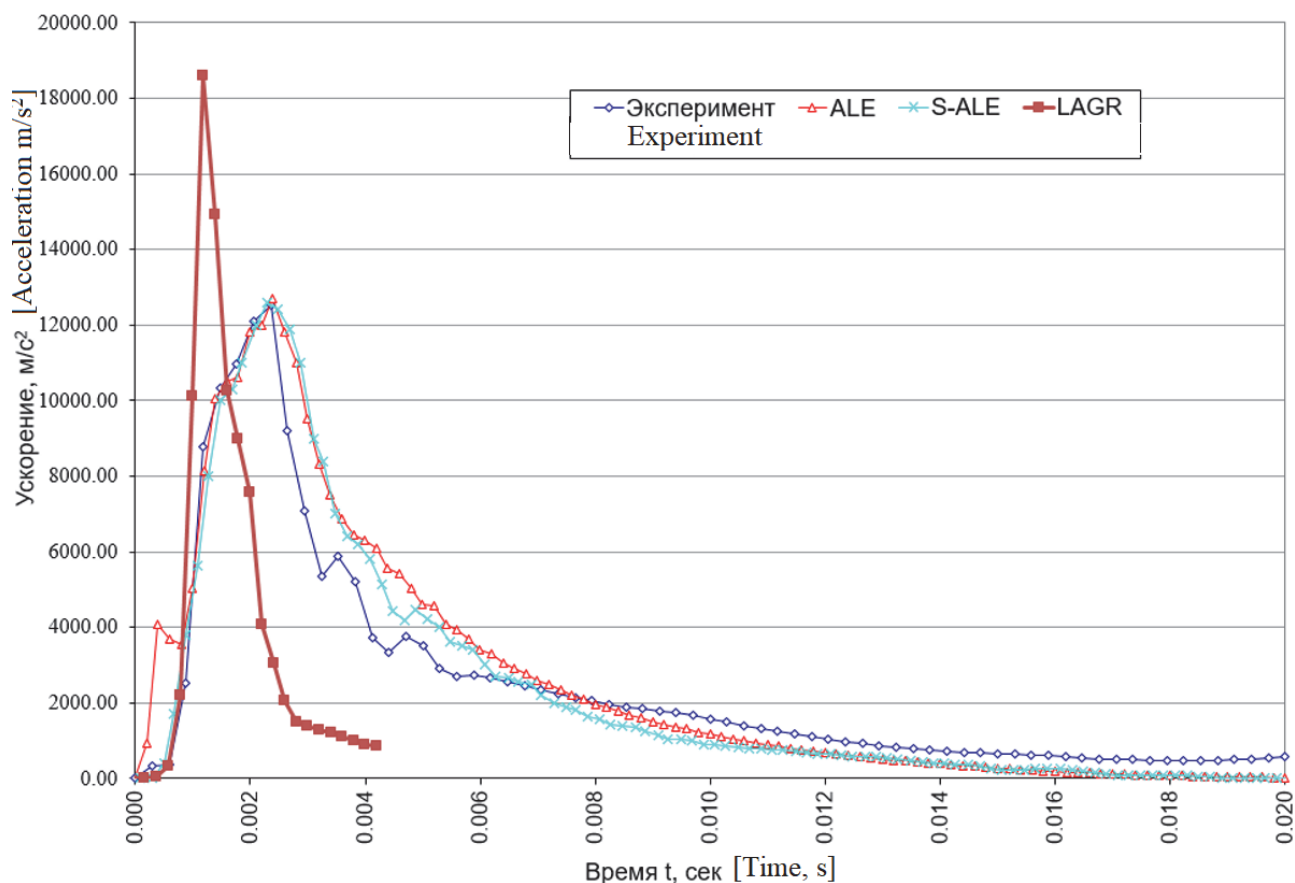


Рис. 10. Графики ускорения полусферы, полученные в результате моделирования и эксперимента
 Figure 10. Hemisphere acceleration plots obtained as a result modeling and experiment

Моделирование падения тяжелого габаритного предмета на подземное сооружение

Для дальнейшего исследования напряженно-деформированного состояния сооружения и грунта вокруг него рассмотрим свободное падение с высоты цилиндрического жесткого тела диаметром 3 м (далее – ударник), которое падает торцевой плоской частью на грунт. Известно, что при свободном падении тела скорость его соударения с грунтом будет выражаться из равенства потенциальной и кинетической энергии:

$$mgh = \frac{mv^2}{2}, \quad (19)$$

где m – масса падающего тела; g – ускорение свободного падения; h – высота падения.

Из (19) скорость соударения будет выражаться как

$$V = \sqrt{2gh}. \quad (20)$$

В качестве исходных данных примем высоту падения 60 м, а вес падающего ударника 6 т. Тогда скорость соударения из (20) составит 34,3 м/с. Рассмотрим однопролетное сооружение (рис. 11, 12), предназначенное для укрытия личного состава от падения обломков на космодроме. Размеры сооружения в плане 6×6 м и высотой в свету 4 м. Толщины стен и покрытия 400 мм. Заглубление покрытия от поверхности грунта принимается на основании сравнения экономической эффективности, то есть, с одной стороны, заглубление должно быть небольшим для уменьшения давления грунта, а с другой стороны – дисперсный грунт должен значительно «сдемпфировать» принимаемый удар, что происходит за счет уплотнения и появления пластических деформаций в грунте. Таким образом, высота засыпки принимается ниже зоны пластических деформаций. В нашем случае зона больших деформаций и уплотнения соста-

вила около 1 м. Принимаем заглубление покрытия 1,5 м. В качестве исходной нагрузки принята нагрузка от собственного веса сооружения и грунтового массива.

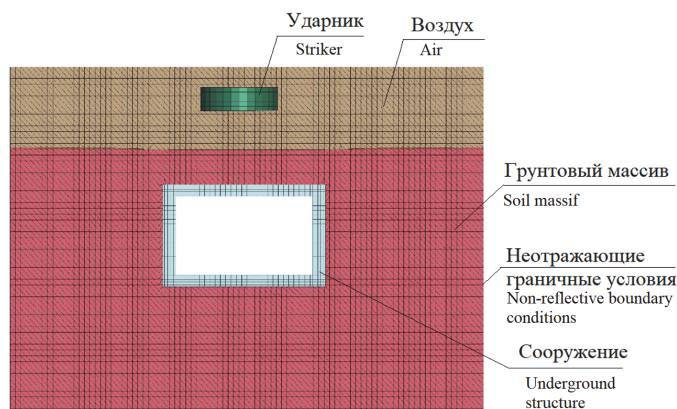


Рис. 11. Расчетная модель
Figure 11. Calculation model

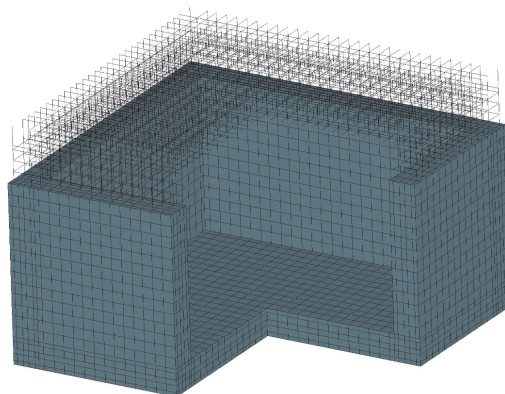


Рис. 12. Армирование сооружения
Figure 12. Reinforcement of the structure

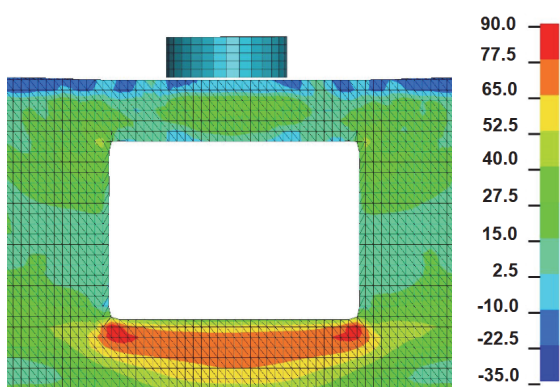


Рис. 13. Изополя давлений в момент времени перед ударом 0,3218 с, кПа
Figure 13. Pressure at the time moment before the shock 0.3218 s, kPa

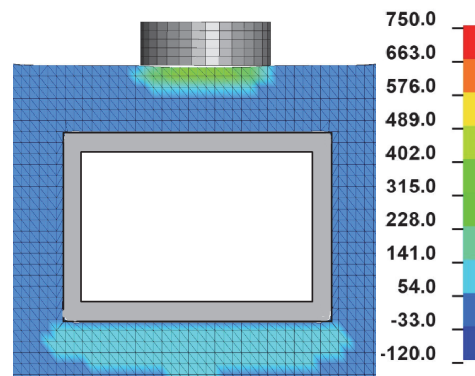


Рис. 14. Изополя давления в момент времени 0,3248 с (начало удара)
Figure 14. Pressure at the moment of time 0.3248 s (the beginning of the impact)

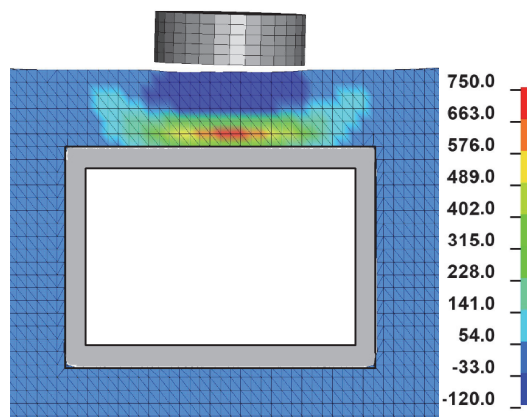
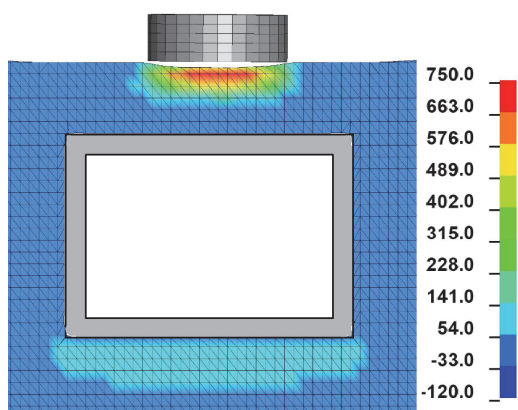


Рис. 15. Изополя давления в различные моменты времени, кПа:
а – 0,3412 с; б – 0,3552 с
Figure 15. Pressure at different points in time, kPa:
а – 0.3412 s; б – 0.3552 s

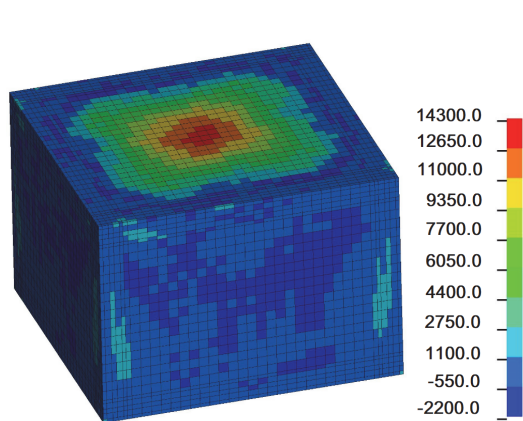


Рис. 16. Изополя давления на покрытие сооружения, кПа
Figure 16. Pressure on the coating of the structure, kPa

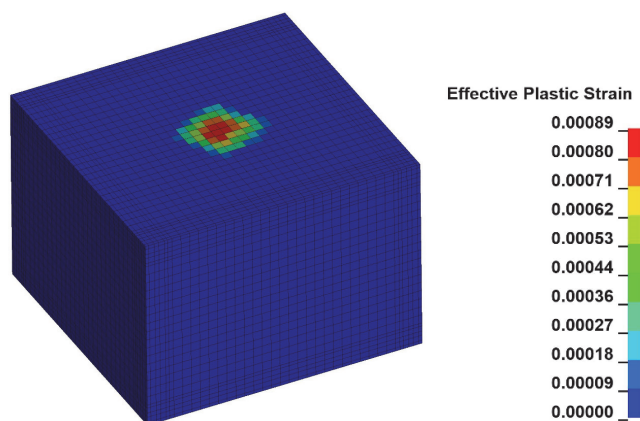


Рис. 17. Мозаика эффективных пластических напряжений
Figure 17. Effective plastic stresses

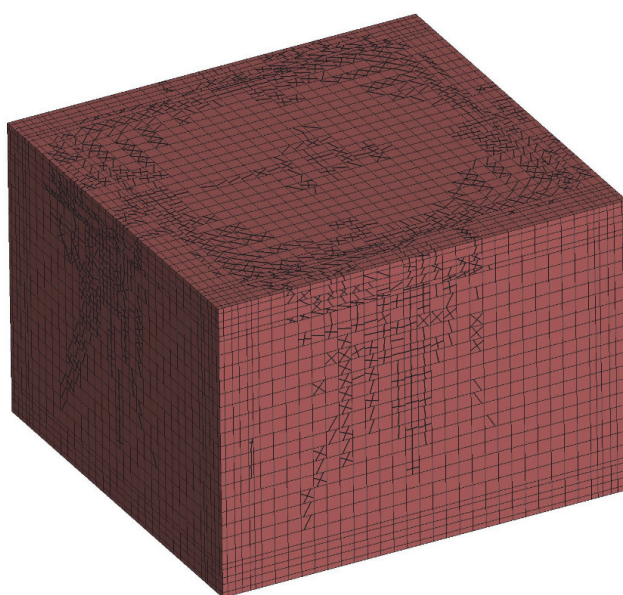


Рис. 18. Картина трещинообразования в стенах сооружения после удара
Figure 18. The picture of cracking in the walls of the structure after impact

Как и на первой стадии расчета (для получения более точного решения), рассматривались несколько расчетных моделей с измельчением размера конечного элемента от 25 до 15 см. В итоге был определен оптимальный размер конечного элемента – 20×20 см.

В результате выполненного расчета (рис. 13–18) получена деформированная модель «цилиндрический ударник – грунт – сооружение». Из расчета получено, что при воздействии на грунт ударник заглубляется в него на 2 см, и на рис. 14 и 15 по приведенным изополям давления можно увидеть, что вскоре после удара ударника о грунт происходит распространение волны сжатия до покрытия сооружения (давление на покрытие сооружения см. на рис. 16). После этого в стенах и покрытии сооружения появляются трещины шириной до 0,5 мм (рис. 18), при этом армирование работает в упругой стадии, что свидетельствует о правильно подобранных армировании и толщине конструкций. Нижнее и верхнее армирование покрытия принято сеткой Ø25A500 с шагом 200×200 мм, поперечное армирование Ø12A500 с шагом 200×200 мм.

Заключение

Разработана конечно-элементная методика расчета подземного сооружения в нелинейной динамической постановке при соударении с грунтом большого габаритного предмета. Результаты расчета показывают, что приведенная методика позволяет выполнять подобные расчеты с необходимой точностью и

получать близкую к реальной картину взаимодействия грунтового массива с сооружением после удара. Следует также отметить, что габаритными предметами могут быть не только падающие предметы при аварии ракет, но также различные строительные конструкции, падающие на грунт при обрушении здания или сооружения.

Список литературы

1. Корнев Б.Г., Рабинович И.М. Динамический расчет зданий и сооружений М.: Стройиздат, 1984. 304 с.
2. Корнев Б.Г., Рабинович И.М. Динамический расчет сооружений на специальные воздействия М.: Стройиздат, 1981. 155 с.
3. Попов Н.Н., Расторгуев Б.С. Динамический расчет железобетонных конструкций М.: Стройиздат, 1974. 220 с.
4. Котляревский В.А., Ганушкин В.И., Костин А.А., Костин А.И., Ларионов В.И. Убежища гражданской обороны. Конструкции и расчет. М.: Стройиздат, 1989. 606 с.
5. Боданский М.Д., Горшков А.А. Расчет конструкций убежищ. М.: Стройиздат, 1974. 204 с.
6. Бирбраер А.Н., Роleder А.Ю. Экстремальные воздействия на сооружения. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. 594 с.
7. Wu Y., Crawford J.E., Lan Sh., Magallanes J.M. Validation studies for concrete constitutive models with blast test data // 13th International LS-DYNA Users Conference (online). 2013.
8. Расторгуев Б.С., Плотников А.И., Хуснутдинов Д.З. Проектирование зданий и сооружений при аварийных взрывных воздействиях. М.: АСВ, 2007. 152 с.
9. Павлов А.С. Численное моделирование взрывных воздействий на здания и сооружения произвольной формы // Academia. Архитектура и строительство. 2017. № 3. С. 108–112.
10. Новожилов Ю.В. Методики моделирования взрывов в LS-DYNA // XIV Международная конференция пользователей CADFEM/ANSYS. СПб., 2017.
11. Мкртычев О.В., Дорожнинский В.Б. Анализ подходов к определению параметров взрывного воздействия // Вестник МГСУ. 2012. № 5. С. 45–49.
12. Мкртычев О.В., Дорожнинский В.Б., Лазарев О.В. Расчет конструкций железобетонного здания на взрывные нагрузки в нелинейной динамической постановке // Вестник МГСУ. 2011. № 4. С. 243–247.
13. Савенков А.Ю., Мкртычев О.В. Нелинейный расчет железобетонного сооружения на воздействие воздушной ударной волны // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. № 1. С. 33–45. <http://dx.doi.org/10.22227/1997-0935.2019.1.33-45>
14. Вальгер С.А. Создание вычислительных технологий для расчета ветровых и ударно-волновых воздействий на конструкции: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Новосибирск, 2016. 16 с.
15. Goel M., Matsagar V., Gupta A. An abridged review of blast wave parameters // Defense Science Journal. 2012. Vol. 62. Issue 5. Pp. 300–306.
16. Bate K., Wilson E. Численные методы анализа и метод конечных элементов. М.: Стройиздат, 1982. 448 с.
17. Van Leer B.J. Towards the ultimate conservative difference scheme. Second-order sequel to Godunov's method // Journal of Computational Physics. 1979. Vol. 32. Issue 1. Pp. 101–136.
18. Муйземник А.Ю., Болдырев Г.Г., Арефьев Д.В. Идентификация параметров моделей грунтов // Инженерная геология. 2010. № 3. С. 38–43.
19. 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.
20. Долгов И.А. Моделирование падения спускаемого аппарата «Марс-6» // Гагаринские чтения – 2018: сборник тезисов докладов XLIV Международной молодежной научной конференции. М.: МАИ, 2018. С. 92–93.
21. Evans W., Jonson D., Walker M. An Eulerian approach to soil impact analysis for crashworthiness applications // International Journal of Impact Engineering. 2016. Vol. 91. Pp. 14–24. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2015.12.011>
22. Fasanella E.L., Jackson K.E., Kellas S. Soft soil impact testing and simulation of aerospace structures // Proceedings of the 10th LS-DYNA Users Conference. Dearborn, 2008. Pp. 29–42.
23. Мкртычев О.В., Бусалова М.С. Исследование реакции системы здание-фундаментальная конструкция-грунт основания с учетом и без учета инерционных свойств грунта основания // Theoretical Foundation of Civil Engineering: XXI Slovak-Polish-Russian Seminar. М., 2013. Pp. 75–81.
24. Дударева М.С. Вероятностное моделирование взаимодействия сооружения с основанием при расчете на землетрясение: дис. ... канд. техн. наук. М., 2018. 126 с.
25. Manual for LS-DYNA Soil Material Model 147 Evaluation. Report No FHWA-HRT-04-095. Lincoln: University of Nebraska; 2004. 77 p.
26. Huang Y., Willford M.R. Validation of LS-DYNA® MMALE with blast experiments // 12th International LS-DYNA® Users Conference. San Francisco: Arup, 2012.
27. Schwer L. An introduction to the Winfrith concrete model. Engineering & Consulting Services, 2010. 28 p.
28. Wu Y., Crawford J.E., Magallanes J.M. Performance of LS-DYNA concrete constitutive models // 12th International LS-DYNA Users Conference. San Francisco: Arup, 2012.

References

1. Korenev B.G., Rabinovich I.M. *Dynamic calculation of buildings and structures*. Moscow: Strojizdat Publ.; 1984. (In Russ.)
2. Korenev B.G., Rabinovich I.M. *Dynamic calculation of equipment for special effects*. Moscow: Strojizdat Publ.; 1981. (In Russ.)
3. Popov N.N., Rastorguyev B.S. *Dynamic analysis of reinforced concrete structures*. Moscow: Strojizdat Publ.; 1974. (In Russ.)
4. Kotlyarevskiy V.A., Ganushkin V.I., Kostin A.A., Kostin A.I., Larionov V.I. *Civil defense shelters. Designs and calculation*. Moscow: Strojizdat Publ.; 1989. (In Russ.)
5. Bodanskiy M.D., Gorshkov A.A. *Calculation of structures for shelters*. Moscow: Strojizdat Publ.; 1974. (In Russ.)
6. Birbraer A.N., Roleder A.Yu. *Extreme impacts on structures*. Saint Petersburg: Polytechpress; 2009. (In Russ.)
7. Wu Y., Crawford J.E., Lan S., Magallanes J.M. Validation studies for concrete constitutive models with blast test data. *13th International LS-DYNA Users Conference (online)*. 2013.
8. Rastorguev B.S., Plotnikov A.I., Khusnutdinov D.Z. *Design of buildings and structures exposed to emergency blast effects*. Moscow: ASV Publ.; 2007. (In Russ.)
9. Pavlov A.S. Numerical method of calculation of blast loads pressure to structures with complex geometry shapes. *Academia. Architecture and Construction*. 2017;(3):108–112. (In Russ.)
10. Novozhilov Y.V. Explosion simulation techniques in LS-DINA. *XIV International Conference of CADFEM users/ANSYS*. Saint Peterburg; 2017. (In Russ.)
11. Mkrtychev O.V., Dorozhinskiy V.B. Analysis of approaches to determining the parameters of explosive impact. *Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering*. 2012;(5):45–49. (In Russ.)
12. Mkrtychev O.V., Dorozhinskiy V.B., Lazarev O.V. Calculation of structures of a reinforced concrete building for explosive loads in a nonlinear dynamic setting. *Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering*. 2011;(4):243–247. (In Russ.)
13. Savenkov A.Y., Mkrtychev O.V. Nonlinear calculation of reinforced concrete structures to the impact of the air shock wave. *Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering*. 2019;14(1):33–45. (In Russ.) [http://dx.doi.org/10.22227/1997-0935.2019.1.33–45](http://dx.doi.org/10.22227/1997-0935.2019.1.33-45)
14. Valger S.A. *Creation of computational technologies for calculating wind and shock-wave effects on structures* (Thesis of Candidate of Technical Sciences). Novosibirsk; 2015. (In Russ.)
15. Goel M., Matsagar V., Gupta A. An abridged review of blast wave parameters. *Defense Science Journal*. 2012; 62(5):300–306. (In Ind.)
16. Bate K., Vilson Ye. *Numerical analysis and finite element method*. Prentice-Hall; 1982.
17. Van Leer B.J. Towards the ultimate conservative difference scheme. Second-order sequel to Godunov's method. *J. Comput. Phys*. 1979;32(1):101–136. (In Dutch.)
18. Muzemnik A.Yu., Boldyrev G.G., Arefyev D.V. Identification of soil models parameters. *Engineering Geology World*. 2010;(3):38–43. (In Russ.)
19. Mkrtychev O., Savenkov A. Modeling of blast effects on underground structure. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2019;15(4):111–122.
20. Dolgov I.A. Simulation of the fall of the descent vehicle Mars-6. *Gagarin Readings – 2018: Collection of Abstracts of the XLIV International Youth Scientific Conference*. Moscow: MAI Publ.; 2018. p. 92–93. (In Russ.)
21. Evans W., Jonson D., Walker M. An Eulerian approach to soil impact analysis for crashworthiness applications. *International Journal of Impact Engineering*. 2016;91:14–24. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2015.12.011>
22. Kellas F.J. Soft soil impact testing and simulation of aerospace structures. *Proceedings of the 10th LS-DYNA Users Conference*. Dearborn; 2008.
23. Mkrtychev O.V., Busalova M.S. Investigation of the reaction of the system building-fundamental structure-foundation soil with and without taking into account the inertial properties of the foundation. *Theoretical Foundation of Civil Engineering: XXI Slovak-Polish-Russian Seminar*. Moscow; 2013. p. 75–81. (In Russ.)
24. Dudareva M.S. *Probabilistic modeling of the interaction of a structure with a base when calculating for an earthquake* (Dissertation of Candidate of Technical Sciences). Moscow; 2018. (In Russ.)
25. *Manual for LS-DYNA Soil Material Model 147 Evaluation*. Report No FHWA-HRT-04-095. Lincoln: University of Nebraska; 2004.
26. Huang Y., Willford M.R. Validation of LS-DYNA® MMALE with blast experiments. *12th International LS-DYNA® Users Conference*. San Francisco: Arup; 2012.
27. Schwer L. *An Introduction to the Winfrith concrete model*. Engineering & Consulting Services; 2010.
28. Wu Y., Crawford J.E., Magallanes J.M. Performance of LS-DYNA concrete constitutive models. *12th International LS-DYNA Users Conference*. San Francisco: Arup; 2012.