© ЗАО НТЦ ПБ

DOI: 10.24000/0409-2961-2023-3-14-21
УДК 614.83
© Коллектив авторов, 2023

Модели бетона и арматуры при взрывных нагрузках

Н.Г. Келасьев, канд. техн. наук, ген. директор

К.В. Авдеев, зам. ген. директора, гл. инженер

Д.И. Левин, инженер

АО «ЦНИИПромзданий», Москва, Россия

М.В. Лисанов, д-р техн. наук, директор центра анализа риска

ЗАО НТЦ ПБ, Москва, Россия

В.В. Бобров, канд. техн. наук, доцент, bobrovvv@mgsu.ru

НИУ МГСУ, Москва, Россия

В статье приводятся сведения о физико-механических свойствах арматурной стали и бетона при взрывных нагрузках и описание математических моделей бетона и арматуры. Выполнен расчет железобетонной плиты на действие ударной взрывной волны на основе данных, полученных в ходе экспериментальной программы Blind Blast Test, методом прямого интегрирования уравнений движений во времени. Используется нелинейная модель описания физико-механических свойств материалов арматурной стали и бетона с учетом динамического упрочнения. Проведен сравнительный анализ результатов численного расчета и результатов эксперимента. Получены результаты, показывающие преимущества при использовании данного метода.

Ключевые слова: арматурная сталь, бетон, коэффициент упрочнения, динамический метод расчета, взрывные нагрузки, Blind Blast Test.

Для цитирования: Келасьев Н.Г., Авдеев К.В., Левин Д.И., Лисанов М.В., Бобров В.В. Модели бетона и арматуры при взрывных нагрузках// Безопасность труда в промышленности. 2023. № 3. С. 14–21. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-3-14-21

Models of Concrete and Reinforcement under Explosive Loads

N.G. Kelasyev, Cand. Sci. (Eng.), General Director, **K.V. Avdeev,** Deputy General Director, Chief Engineer, **D.I. Levin,** Engineer (Central Research and Design and Experimental Institute of Industrial Buildings and Structures TsNIIPromzdaniy, Moscow, Russia), **M.V. Lisanov,** Dr. Sci. (Eng.), Director of Risk Analysis Center (STS «Industrial safety» CJSC, Moscow, Russia), **V.V. Bobrov,** Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., bobrovvv@mgsu.ru (Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia)

Abstract. In this article, the mathematical models of structural materials describing their dynamic properties are considered for calculating building structures for the action of dynamic loads. Physical and mechanical properties are described related to reinforcing steel and concrete under the action of explosive loads, as well as the influence of the loading rate and other factors on the deformation diagram of steel and concrete. The analysis is carried out concerning the reasons for the increase in the resistance of concrete and reinforcement under rapidly increasing loads. The relevance of the topic is determined by its compliance with the main goals and objectives of the Russian state policy in the field of improving the safety of buildings and structures when exposed to explosive loads. The article describes the methods of mathematical description of the structural materials behavior under the action of explosive loads. A simplified method for modeling the dynamic properties of reinforcing steel and concrete by multiplying the calculated resistance by the dynamic strengthening factor, as well as a more time-consuming method based on the equations of gas-hydrodynamics and implemented in the LS-DYNA software package, are considered. The authors used the method of taking into account the dynamic strengthening of reinforcing steel and concrete based on the nonlinear behavior of materials using diagrams with a piecewise linear description. Dynamic hardening was considered using hardening factors. The purpose of the study is to compare the results of numerical calculation according to the method proposed by the authors with the data obtained during the experimental program Blind Blast Test. The calculation was carried out by the finite element method using the Lira 10.12 calculation complex. The DYNAMICS+ system was used to simulate the load from the action of an external explosion. The experimental model is a reinforced concrete slab reinforced with ASTM Grade 60#3 rods. The results of numerical calculation showed high convergence with the experimental program. The use of the method of accounting for the dynamic hardening of reinforcing steel and concrete, based on the nonlinear behavior of materials using diagrams with a piecewise linear description, is the most optimal model that allows to get a fairly accurate solution and at the same time is acceptable from the point of view of labor intensity. This article is of interest to design engineers engaged in the calculation of structures for explosive loads.

Keywords: reinforcing steel, concrete, hardening factor, dynamic calculation method, explosive loads, Blind Blast Test.
For citation: Kelasyev N.G., Avdeev K.V., Levin D.I., Lisanov M.V., Bobrov V.V. Models of Concrete and Reinforcement under Explosive Loads. *Bezopasnost Truda v Promyshlennosti = Occupational Safety in Industry.* 2023. № 3. pp. 14–21. (In Russ.). DOI: 10.24000/0409-2961-2023-3-14-21

Введение

Расчет зданий и сооружений на взрывные нагрузки является одной из важных процедур оценки последствий аварийного взрыва на опасных производственных объектах [1]. Как известно, расчеты строительных конструкций на действие динамических нагрузок проводят с использованием математических моделей конструкционных материалов, описывающих их динамические свойства. При этом могут использоваться как упрощенные математические модели, так и более сложные. Все эти модели имеют свои преимущества и недостатки. Поэтому актуальной задачей для инженера-проектировщика является выбор наиболее оптимальной модели для решения конкретной задачи, которая позволит найти достаточно точное решение и одновременно будет наименее трудоемкой.

Цель исследования — провести сравнение результатов численного расчета с данными, полученными в ходе экспериментальной программы Blind Blast Test[1] [2]. Расчет проводился методом конечных элементов с использованием расчетного комплекса ЛИРА 10.12[*]. Для моделирования нагрузки от действия внешнего взрыва использовалась расчетно-графическая система ДИНАМИКА+. Нелинейные свойства материалов бетона и арматуры учитывались диаграммами с кусочно-линейным описанием.

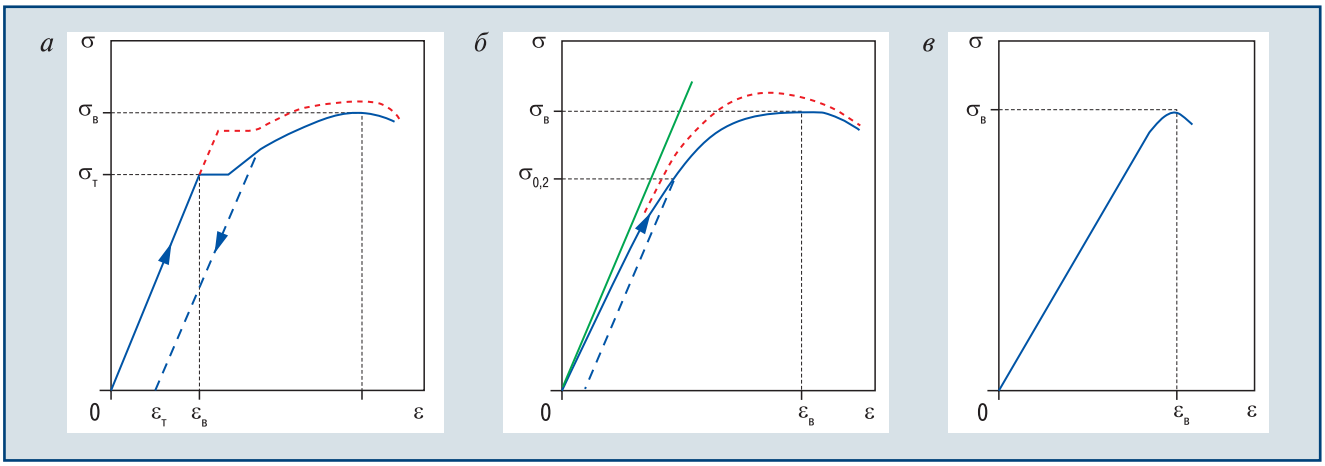
Физико-механические свойства арматурной стали при взрывных нагрузках

Изучению прочностных и деформационных характеристик арматурной стали посвящено большое число исследований [2–5]. Установлено, что прочность арматурной стали зависит от скорости изменения нагрузки на конструкцию.

В настоящее время считают, что общий характер кривой ε–σ при медленном и быстром нагружении одинаков, но изменяются количественные значения ее параметров в зависимости от типа арматурной стали. Типы диаграмм деформирования материалов показаны на рис. 1 (здесь *а* — с физическим пределом текучести; *б* — с условным пределом текучести; *в* — хрупкий; σ — напряжения; $\sigma_в$ — временное сопротивление; $\sigma_т$ — предел текучести; $\sigma_{0,2}$ — напряжения, соответствующие величине остаточной деформации 0,2 %; ε, $\varepsilon_в$, $\varepsilon_т$ — относительные деформации при соответствующих напряжениях).

Развитые на основе теории дислокаций начала динамического расчета, учитывающие эффект запаздывания, также получили широкое распространение в практике расчета.

Предполагается, что время запаздывания текучести отождествляется со временем блокировки дислокаций «облаком» примесных атомов и определяется из функционального равенства [6]:



▲ **Рис. 1. Типы диаграмм деформирования материалов**
▲ **Fig. 1. Types of deformation diagrams of materials**

$$1 = \frac{1}{t_0^0}\int_0^{t_0}\varphi(\sigma_1, T)\,dt,$$

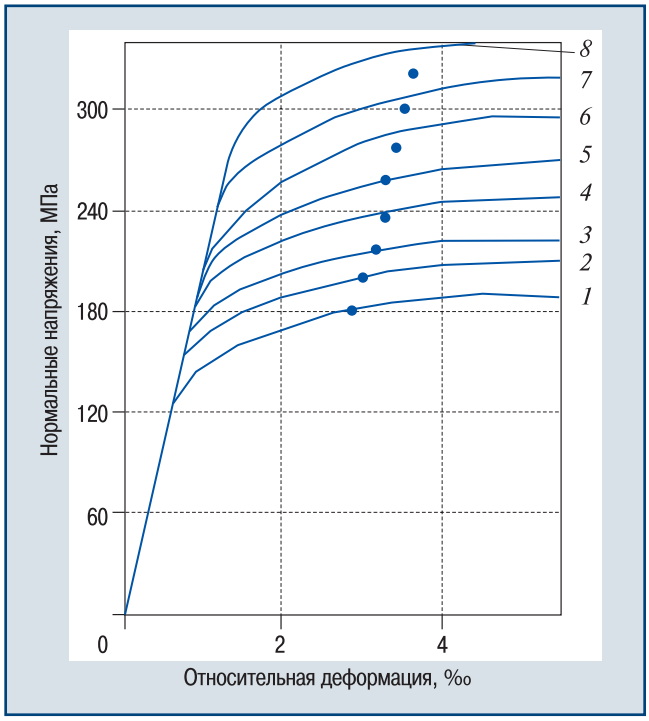
где t_0^0 — нормирующая постоянная; t_0 — время запаздывания; $\varphi(\sigma_1, T)$ — функция напряжения σ_1 и температуры T, определяемая физикой явления.

[1] Schwer L. Blind blast simulation simple input concrete modeling. URL: https://www.dynamore.de/de/download/papers/2014-ls-dyna-forum/dynamore/de/download/papers/2014-ls-dyna-forum/documents/simulationsmethodik-iii/blind-blast-simulationa-a-validation-effort-assessment (дата обращения: 10.01.2023).

[*] Программный комплекс ЛИРА 10.12. Руководство пользователя. URL: https://lira-soft.com/upload/iblock/7b9/an6bai2i3shhypwx4gdz9f0lly5daoqv/Rukovodstvo_pol_zovatelya_LIRA_10.12.pdf (дата обращения: 10.01.2023).

© ЗАО НТЦ ПБ

Двойственная модель твердого деформируемого тела, учитывающая хрупкие и пластические свойства, предложена в работе [3]. Результаты расчета по этой модели при сопоставлении с результатами опытов [7] показали удовлетворительную сходимость. Влияние скорости нагружения на диаграмму деформирования стали показано на рис. 2 (здесь кривые — расчет; точки — опыт [8]; *1* — исходная кривая, соответствующая малой скорости нагружения).



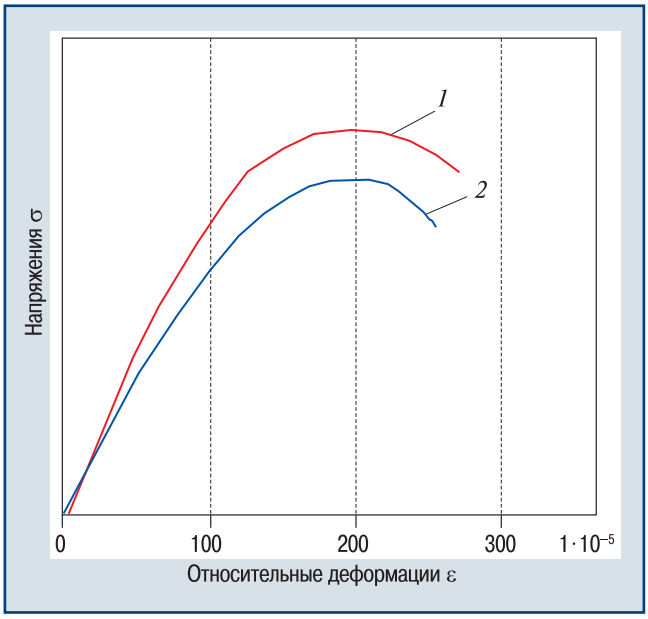
▲ **Рис. 2. Влияние скорости нагружения на диаграмму деформирования стали**
▲ **Fig. 2. Influence of the loading rate on the steel deformation diagram**

Для высокопрочных и термически упрочненных арматурных сталей скоростные эффекты проявляются слабо, поэтому в динамических расчетах конструкций с такой арматурой можно использовать статические диаграммы ε–σ.

Несмотря на значительное число проделанных испытаний, до настоящего времени каких-либо закономерностей в изменении динамического предела текучести в зависимости от химического состава, способа приготовления и обработки стали установлено не было. Поэтому имеющиеся в литературе многочисленные аналитические зависимости между динамическим пределом текучести и скоростями деформирования, основанные на экспериментальных данных, не являются общими и, как правило, справедливы лишь для конкретных условий, в которых определялась та или иная величина.

Физико-механические свойства бетона при взрывных нагрузках

Исследования бетона при больших скоростях деформирования показывают, что прочность бетона при динамическом нагружении выше, чем при статическом [8–11]. Кроме того, при динамических испытаниях наблюдается запаздывание неупругих деформаций, которые в основном проявляются лишь при усилии, близком к предельному статическому (рис. 3, здесь *1* — динамическая диаграмма; *2* — статическая диаграмма). До этого момента деформации бетона развиваются по линейному закону, т.е. могут рассматриваться как упругие. Модуль деформации бетона несколько возрастает (на 10–15 %).



▲ **Рис. 3. Диаграммы деформаций бетона**
▲ **Fig. 3. Concrete deformation diagrams**

Динамическая прочность бетона зависит от свойств применяемых материалов, особенностей структуры бетона и содержания влаги. Например, неоднородность микроструктуры бетона и первоначальные дефекты снижают динамическую прочность бетона в большей степени, чем статическую. Динамическая прочность бетона при насыщении водой повышается, статическая снижается.

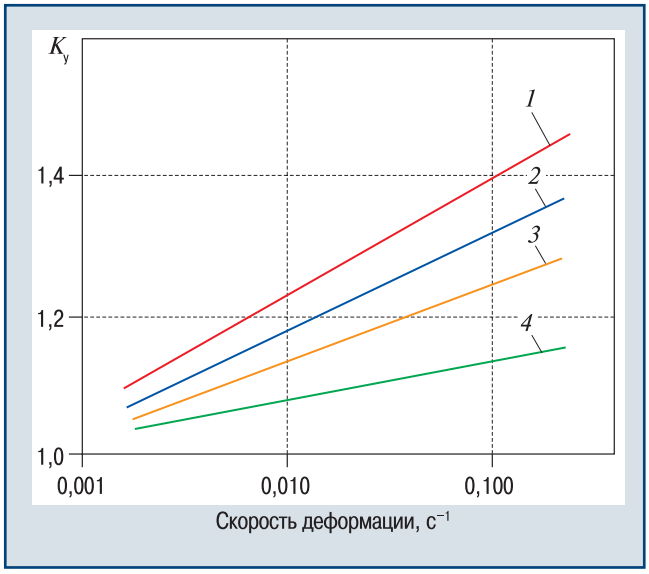
В последние годы исследуют закономерность деформирования бетонов под влиянием скорости деформирования [11]. Сложность этой задачи заключается в том, что бетон по структуре — неоднородный материал. Присутствие в бетоне одновременно твердой, жидкой и газообразной фаз обусловливает сложную картину поведения бетона под воздействием нагрузки. Бетон рассматривают как двухфазную среду, состоящую из твердой и жидкогазовой фаз. В такой модели напряжения σ и деформации ε твердой фазы «скелета» связаны законом Гука $\sigma = E\varepsilon$ (здесь E — модуль упругости), а напряжения жидкой фазы зависят от скорости деформаций и изменяются по закону идеально вязкой жидкости $\sigma = k\varepsilon$ (здесь k — коэффициент вязкости). При действии нагрузки деформация «скелета» вызывает перераспределение жидкогазовой фазы в порах «скелета». Чем больше

скорость деформации «скелета», тем сильнее сопротивление жидкогазовой среды. Этим объясняют, что при быстро возрастающих нагрузках сопротивляемость бетона увеличивается.

Математические модели бетона и арматуры

В настоящее время инженеру-проектировщику доступно множество методов математического описания поведения конструкционных материалов при действии взрывных нагрузок. Перечислим некоторые наиболее популярные методы.

Упрощенный способ моделирования динамических свойств арматурной стали и бетона осуществляется путем умножения расчетного сопротивления на коэффициент динамического упрочнения $K_у$ [12, 13]. Как показано на рис. 4 (здесь арматурные стали: *1* — А240; *2* — А300; *3* — А400; 5 — А500–А600) и рис. 5 (здесь *а* — скорость деформации при сжатии; *б* — скорость деформации при растяжении; *1* — область импульсных нагружений; *2* — область ударных нагружений) коэффициент $K_у$ зависит от скорости деформации $\dot{\varepsilon}$.

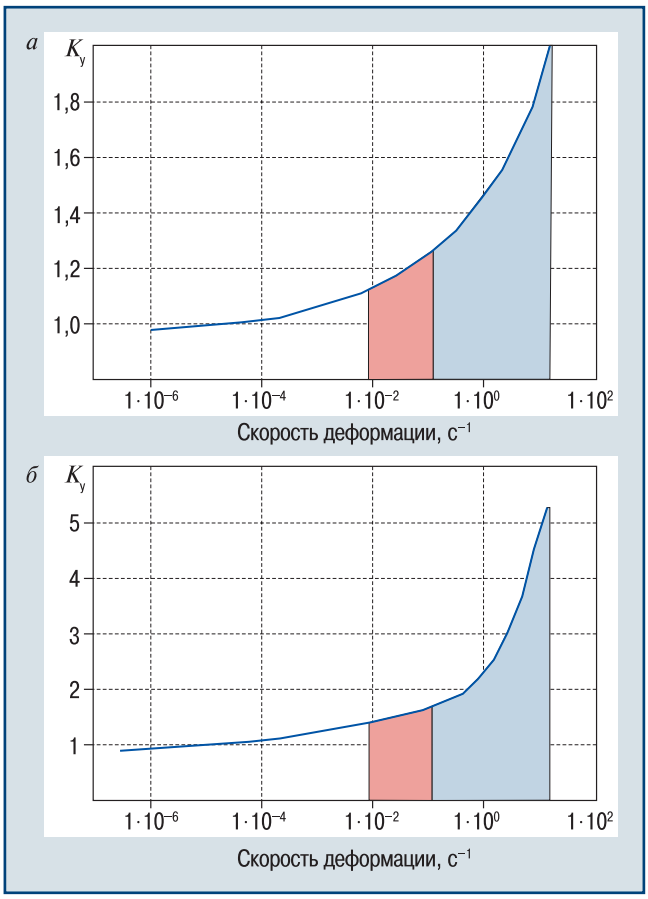


▲ **Рис. 4. Зависимость коэффициента упрочнения арматурных сталей от скорости деформации**
▲ **Fig. 4. Dependence of the reinforcement steel hardening coefficient on the deformation rate**

Самый трудоемкий метод основан на уравнениях газогидродинамики и может быть реализован в программном комплексе LS-DYNA [14, 15].

Поведение материала арматурной стали реализуется при помощи карты *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY. Модель учитывает критерии предельных состояний в форме Губера — Мизеса и скоростное упрочнение для материала.

Для описания поведения бетона применяется модель CSCM (англ. Continuous Surface Cap Model — шатровая модель с непрерывной предельной поверхностью), в которой полагается, что материал является изотропным, обладает трехинвариантной



▲ **Рис. 5. Графики зависимости коэффициентов динамического упрочнения бетона от скорости деформации**
▲ **Fig. 5. Graphs of the dependence of the coefficients of dynamic hardening of concrete on the deformation rate**

поверхностью текучести. Прочностные характеристики материала зависят от скорости нагружения, а его поврежденность рассматривается отдельно для сжимающих и растягивающих нагрузок, что позволяет учитывать частичное восстановление прочности при сжатии.

В данном исследовании авторами используется метод учета динамического упрочнения арматурной стали и бетона, основанный на нелинейном поведении материалов с использованием диаграмм с кусочно-линейным описанием. Динамическое упрочнение учитывается при помощи коэффициентов упрочнения, которые могут быть определены по графикам (см. рис. 4 и 5). При этом скорость деформации можно определять как среднюю за период ее упругой работы по формуле:

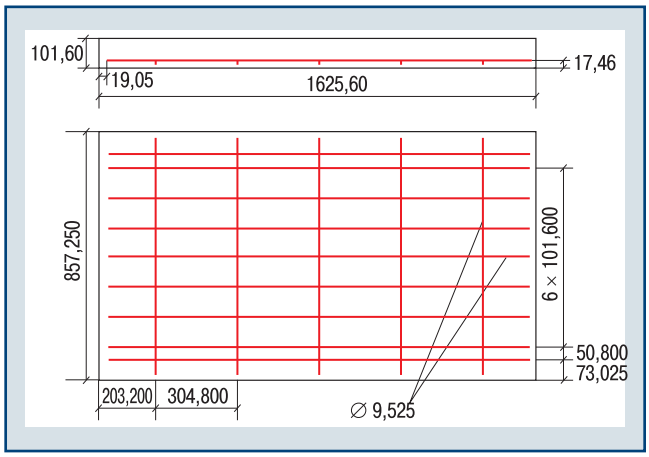
$$\dot{\varepsilon} = \frac{R_д}{E_{ст}\tau},$$

где $R_д$ — динамическое расчетное сопротивление стали (бетона), $R_д = K_у R_{ст}$; $K_у$ — коэффициент динамического упрочнения; $R_{ст}$ — статическое расчетное сопротивление стали (бетона); $E_{ст}$ — модуль упругости стали (бетона); τ — время упругого деформирования.

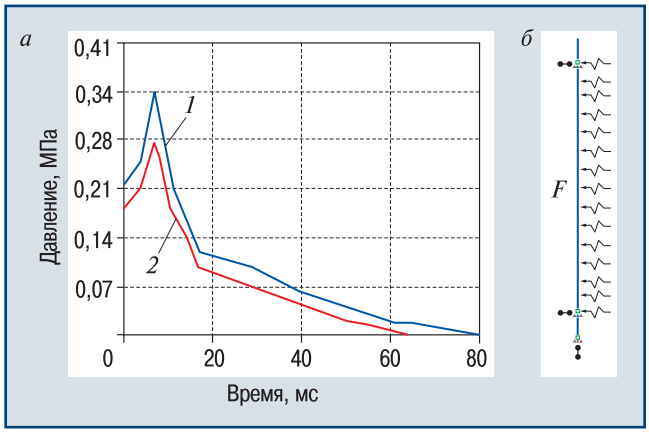
© ЗАО НТЦ ПБ

Численный расчет

В качестве верификации численных расчетов во временной области в нелинейной постановке использованы данные, полученные в ходе экспериментальной программы Blind Blast Test [16]. Экспериментальная модель представляет собой железобетонную плиту, армированную стержнями ASTM Grade 60#3 (диаметр 9,5 мм) [17]. Основные геометрические параметры модели представлены на рис. 6 (здесь размеры приведены в мм). Избыточное давление от взрывной волны регистрировалось датчиками, расположенными на опорной раме в ударной трубе (рис. 7, здесь *1* — нагрузка типа 1a; *2* — нагрузка типа 1b; *F* — нагрузка).



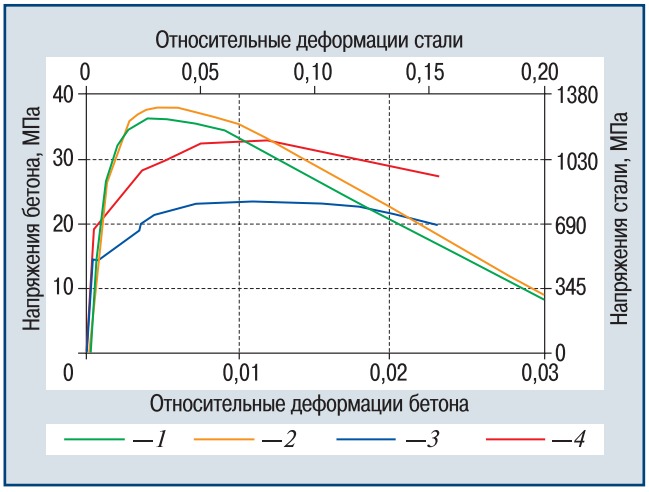
▲ **Рис. 6. Размеры плиты и расположение арматуры**
▲ **Fig. 6. Dimensions of the plate and the location of the reinforcement**



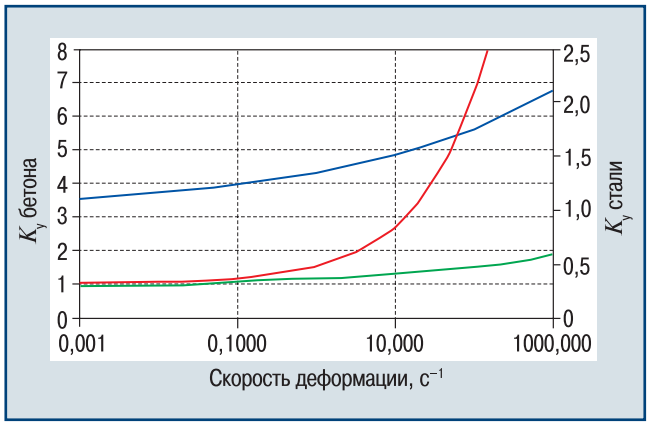
▲ **Рис. 7. График избыточного давления (*а*) и расчетная схема (*б*)**
▲ **Fig. 7. Overpressure graph (*a*) and design scheme (*б*)**

Эксперимент проводился на трех образцах железобетонной плиты. При этом два первых образца подвергались нагрузке типа 1a, а третий — нагрузке типа 1b.

Математическое описание физико-механических характеристик используемых материалов бетона и арматуры представлено на рис. 8 (здесь *1* — бетон; *2* — бетон, упрочнение; *3* — сталь; *4* — сталь, упрочнение). При этом упрочнение арматуры и бетона учитывалось коэффициентами упрочнения K_y, которые зависят от скорости деформаций (рис. 9, здесь *1* — сжатый бетон; *2* — растянутый бетон; *3* — сталь).



▲ **Рис. 8. Конструктивные модели материалов**
▲ **Fig. 8. Structural models of materials**



▲ **Рис. 9. Различные модели из бетона и стали**
▲ **Fig. 9. Various models made of concrete and steel**

Численное моделирование в рамках данной работы проводилось с использованием расчетного комплекса ЛИРА 10.12 [18].

Входные данные, используемые при выполнении численного расчета, представлены на рис. 10–13.

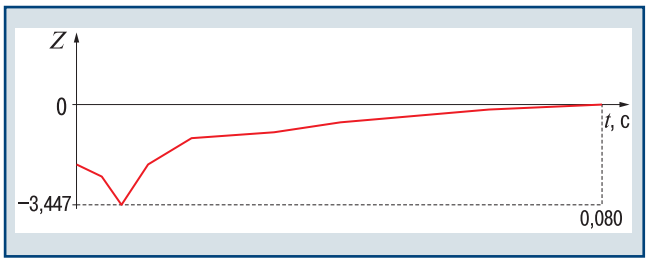
Результаты численного расчета представлены на рис. 14–18 (здесь *а* — при действии нагрузки типа 1a; *б* — типа 1b).

На рис. 19 представлены графики перемещений по времени для центральной точки плиты, а сравнение этих перемещений с данными, полученными в результате эксперимента Blind Blast Test, — на рис. 20 (здесь *1* — расчет 1a; *2* — расчет 1b; *3* — эксперимент 1a; *4* — эксперимент 1aa; 5 — эксперимент 1b).

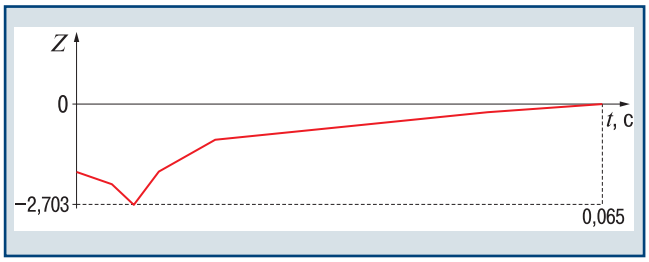
Как видно из представленных результатов численного расчета (см. рис. 20), сходимость с экспериментальными перемещениями очень хорошая. При нагрузке типа 1a процент сходимости не ниже 80 %, а при нагрузке типа 1b — не ниже 70 %.

▲ **Рис. 10. Диаграмма материала бетона с учетом K_y**
▲ **Fig. 10. Diagram of concrete material considering K_y**

▲ **Рис. 11. Диаграмма материала арматуры с учетом K_y**
▲ **Fig. 11. Diagram of reinforcement material considering K_y**



▲ **Рис. 12. Узловая нагрузка типа 1a (кН)**
▲ **Fig. 12. Nodal load type 1a (kN)**



▲ **Рис. 13. Узловая нагрузка типа 1b (кН)**
▲ **Fig. 13. Nodal load type 1b (kN)**

Выводы

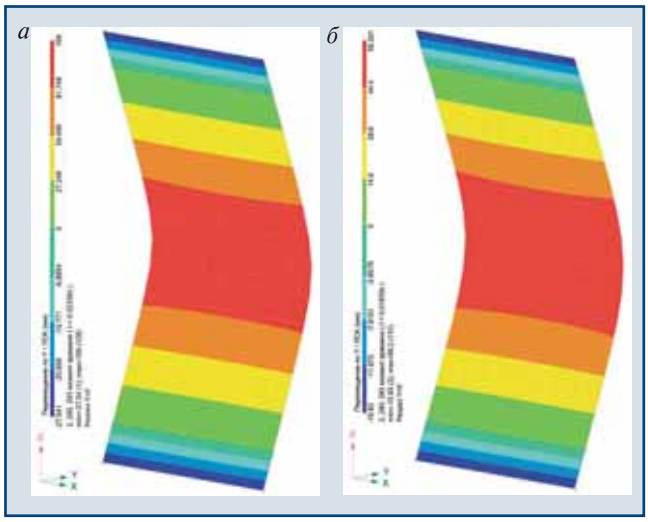
1. Расчет железобетонной плиты на действие ударной взрывной волны в нелинейной динамической постановке показал:

результаты численного расчета и эксперимента имеют хорошую сходимость;

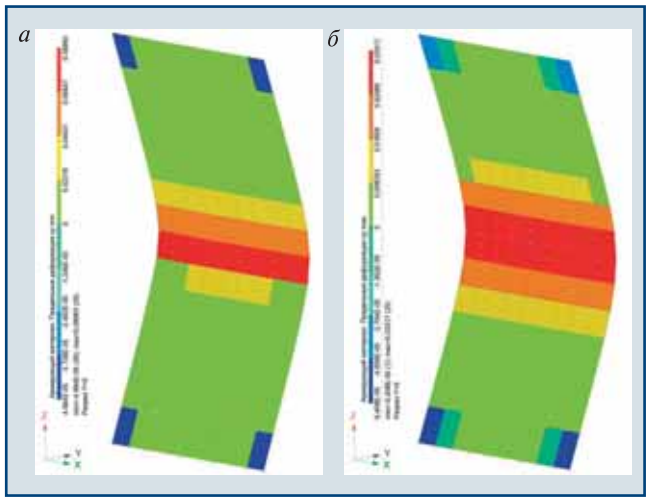
имеется возможность учета нелинейных свойств конструкционных материалов, а также динамического упрочнения;

в результате расчета получают перемещения в каждый момент времени, а также напряжения и относительные деформации бетона и арматуры.

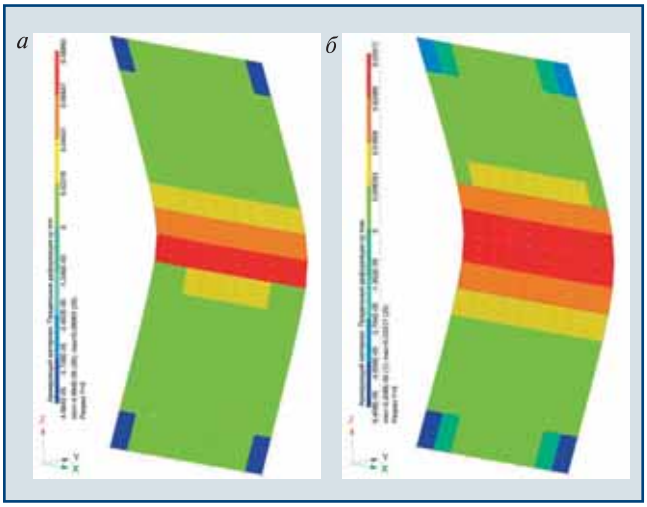
2. Показано, что использование метода учета динамического упрочнения арматурной стали и бетона,



▲ **Рис. 14. Изополя максимальных перемещений (мм)**
▲ **Fig. 14. Isofields of maximum displacements (mm)**

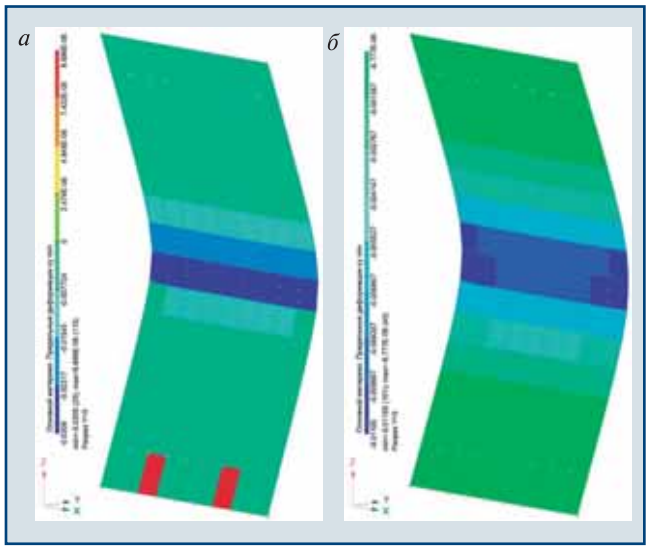


▲ **Рис. 15. Изополя максимальных относительных деформаций арматуры**
▲ **Fig. 15. Isofields of maximum relative deformations of reinforcement**

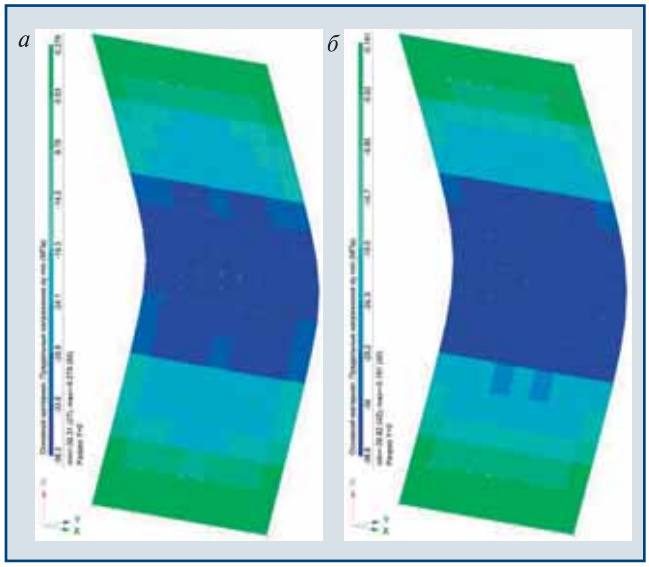


▲ **Рис. 16. Изополя максимальных напряжений в арматуре (МПа)**
▲ **Fig. 16. Isofields of maximum stresses in reinforcement (MPa)**

© ЗАО НТЦ ПБ

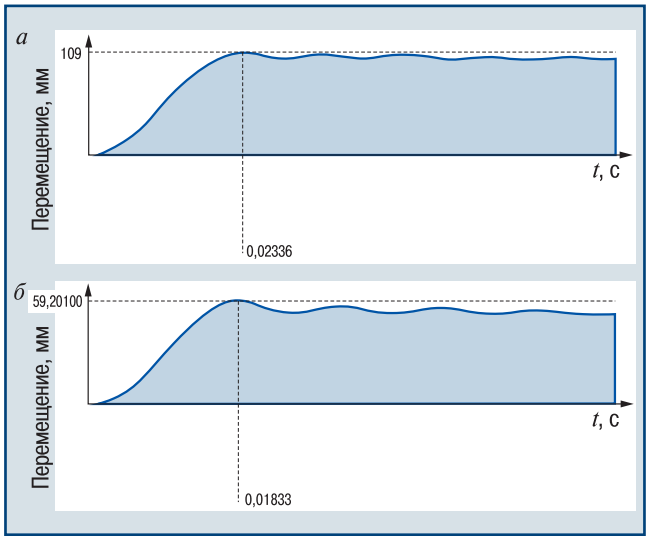


▲ **Рис. 17. Изополя максимальных относительных деформаций бетона**
▲ **Fig. 17. Isofields of maximum relative deformations of concrete**

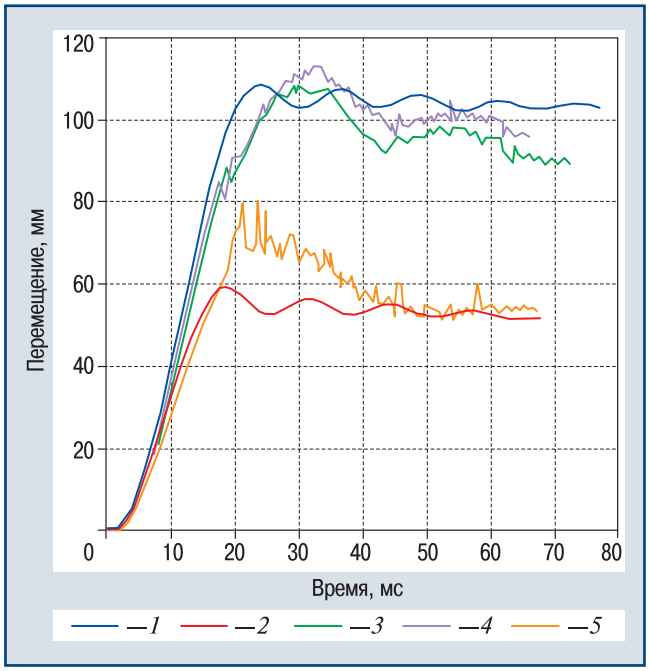


▲ **Рис. 18. Изополя максимальных напряжений в бетоне (МПа)**
▲ **Fig. 18. Isofields of maximum stresses in concrete (MPa)**

основанного на нелинейном поведении материалов с использованием диаграмм с кусочно-линейным описанием, является наиболее оптимальной моделью, которая позволяет получить достаточно точное решение и одновременно является приемлемой с точки зрения трудоемкости.



▲ **Рис. 19. График перемещений по времени для центрального узла расчетной схемы при нагрузке типа 1а (*а*) и 1b (*б*)**
▲ **Fig. 19. Time displacement graph for the central node of the design scheme under load type 1a (*a*) and type 1b (*б*)**



▲ **Рис. 20. Численные расчеты в сравнении с экспериментальными перемещениями (мм)**
▲ **Fig. 20. Numerical calculations in comparison with experimental displacements (mm)**

Список литературы

1. *О совершенствовании* нормативных требований к конструкциям зданий и сооружений на взрывопожароопасных производственных объектах/ К.В. Авдеев, В.В. Бобров, Д.И. Левин и др.// Безопасность труда в промышленности. 2022. № 11. С. 85–92. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-11-85-92

2. *Котляревский В.А., Сенюков А.В., Бродецкая Л.А.* Расчет железобетонных конструкций за пределом упругости на действие ударной волны на ЭЦВМ. М.: ЦНИиИИ им. Д.М. Карбышева, 1966. 55 с.

3. *Кузьменко В.А.* Новые схемы деформирования твердых тел. Киев: Наукова думка, 1973. 200 с.

4. *Работнов Ю.Н.* Модель упруго-пластической среды с запаздыванием текучести// Прикладная механика и техническая физика. 1968. № 3. С. 45–54.

5. *Kelly J.M.* Strain rate sensitivity and yield point behavior in mild steel// International Journal of Solids and Structures. 1967. № 3. P. 521–532.

6. *Работнов Ю.Н., Суворова Ю.В.* О законе деформирования металлов при одноосном нагружении// Известия АН СССР. Механика твердого тела. 1972. № 4. С. 41–54.

7. *Надаи А.* Пластичность и разрушение твердых тел. В 2 т. Т. 1. М.: Иностранная литература, 1954. 648 с.

8. *Расчет* железобетонных конструкций на взрывные и ударные нагрузки/ Н.Н. Белов, Д.Г. Копаница, О.Г. Кумпяк, Н.Т. Югов. Нортхэмптон–Томск, 2004. 435 с.

9. *Анализ* динамической прочности строительных конструкций на взрывные и ударные нагрузки расчетно-экспериментальным методом/ Н.Н. Белов, Н.Т. Югов, А.С. Пляскин и др. Томск: Изд-во ТГАСУ, 2021. 164 с.

10. *Баженов Ю.М.* Бетон при динамическом нагружении. М.: Стройиздат, 1970. 292 с.

11. *Забегаев А.В.* Оценка эффекта динамического упрочнения в бетоне// Сейсмостойкое строительство. 1995. № 3. С. 17–24.

12. *Руководство* по проектированию и расчету защитных сооружений гражданской обороны. М.: ОАО «ЦНИИПромзданий», 2003. 131 с.

13. *Бирбраер А.Н., Роледер А.Ю.* Экстремальные воздействия на сооружения. СПб: Изд-во Политехнического университета, 2009. 594 с.

14. *Мкртычев О.В., Дорожинский В.Б., Лазарев О.В.* Расчет конструкций железобетонного здания на взрывные нагрузки в нелинейной динамической постановке// Вестник МГСУ (научно-технический журнал по строительству и архитектуре). 2011. № 4. С. 243–247.

15. *Герцик С.М., Новожилов Ю.В., Михалюк Д.С.* Численное моделирование динамики и прочности железобетонной плиты под воздействием воздушной ударной волны// Вычислительная механика сплошных сред. 2020. Т. 13. № 3. С. 298–310. DOI: 10.7242/1999-6691/2020.13.3.24

16. *Modeling* the response of concrete slabs under blast loading/ P. Olmati, P. Trasborg, C. Naito et al. URL: https://www.researchgate.net/publication/303025654_Modeling_the_Response_of_Concrete_Slabs_Under_Blast_Loading (дата обращения: 10.01.2023).

17. *ASTM A615.* Standard specification for deformed and plain carbon-steel bars for concrete reinforcement. URL: https://www.modiranahan.com/uploads/pdf/ASTM-A615.A615M.pdf (дата обращения: 10.01.2023).

18. *ПК ЛИРА 10.* URL: http://lira-soft.com (дата обращения: 10.01.2023).

References

1. Avdeev K.V., Bobrov V.V., Levin D.I., Lisanov M.V., Nevskaya E.E. On the Improvement of Regulatory Requirements for the Structures of Buildings and Structures at Explosive and Fire Hazardous Production Facilities. *Bezopasnost Truda v Promyshlennosti = Occupational Safety in Industry.* 2022. №11. pp. 85-92. (In Russ.). DOI: 10.24000/0409-2961-2022-11-85-92

2. Kotlyarevskiy V.A., Senyukov A.V., Brodetskaya L.A. Calculation of reinforced concrete structures beyond the elastic limit on the action of a shock wave on an electronic digital computer. Moscow: TsNIiII im. D.M. Karbysheva, 1966. 55 p. (In Russ.).

3. Kuzmenko V.A. New schemes of solid bodies deformation. Kyiv: Naukova dumka, 1973. 200 c. (In Russ.).

4. Rabotnov Yu.N. Model of an Elastic-Plastic Medium with Yield Delay. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika = Journal of Applied Mechanics and Technical Physics.* 1968. № 3. pp. 45–54. (In Russ.).

5. Kelly J.M. Strain rate sensitivity and yield point behavior in mild steel. International Journal of Solids and Structures. 1967. № 3. pp. 521–532.

6. Rabotnov Yu.N., Suvorova Yu.V. On the law of metals deformation under uniaxial loading. *Izvestiya AN SSSR. Mekhanika tverdogo tela = Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR. Mechanics of Solids.* 1972. № 4. pp. 41–54. (In Russ.).

7. Nadai A. Plasticity and fracture of solids. In 2 volumes. Vol. 1. Moscow: Inostrannaya literatura, 1954. 648 p. (In Russ.).

8. Belov N.N., Kopanitsa D.G., Kumpyak O.G., Yugov N.T. Calculation of reinforced concrete structures for explosive and shock loads. Northampton–Tomsk, 2004. 435 p. (In Russ.).

9. Belov N.N., Yugov N.T., Plyaskin A.S., Ryshkov A.V., Useinov E.S., Yugov A.A. Analysis of the dynamic strength of building structures for explosive and shock loads by the calculation and experimental method. Tomsk: Izd-vo TGASU, 2021. 164 p. (In Russ.).

10. Bazhenov Yu.M. Concrete under dynamic loading. Moscow: Stroiizdat, 1970. 292 p (In Russ.).

11. Zabegaev A.V. Evaluation of the effect of dynamic hardening in concrete. *Seysmostoykoe stroitelstvo = Earthquake engineering.* 1995. № 3. pp. 17–24. (In Russ.).

12. Guidelines for the design and calculation of protective structures of civil defense. Moscow: OAO «TsNIIPromzdaniy», 2003. 131 p. (In Russ.).

13. Birbraer A.N., Roleder A.Yu. Extreme Actions on Structures. Saint Petersburg: Izd-vo Politekhnicheskogo universiteta, 2009. 594 p. (In Russ.).

14. Mkrtychev O.V., Dorozhinskiy V.B., Lazarev O.V. The calculation of reinforced concrete buildings constructions on the explosive loads in the nonlinear dynamic formulation. *Vestnik MGSU (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal po stroitelstvu i arkhitekture) = Vestnik MGSU (Monthly Journal on Construction and Architecture).* 2011. № 4. pp. 243–247. (In Russ.).

15. Gertsik S.M., Novozhilov Yu.V., Mikhalyuk D.S. Numerical simulation of the dynamics of a reinforced concrete slab under an air shock wave. *Vychislitelnaya mekhanika sploshnykh sred = Computational Continuum Mechanics.* 2020. Vol. 13. № 3. pp. 298–310. (In Russ.). DOI: 10.7242/1999-6691/2020.13.3.24

16. Olmati P., Trasborg P., Naito C., Sgambi L., Bontempi F. Modeling the response of concrete slabs under blast loading. Available at: https://www.researchgate.net/publication/303025654_Modeling_the_Response_of_Concrete_Slabs_Under_Blast_Loading (accessed: January 10, 2023).

17. ASTM A615. Standard specification for deformed and plain carbon-steel bars for concrete reinforcement. Available at: https://www.modiranahan.com/uploads/pdf/ASTM-A615.A615M.pdf (accessed: January 10, 2023).

18. Lira 10 software package. Available at: http://lira-soft.com (accessed: January 10, 2023). (In Russ.).

E-mail: bobrovvv@mgsu.ru

Материал поступил в редакцию/ Received 28.02.2023
После рецензирования/ Revised 06.03.2023
Принят к публикации/ Accepted 12.03.2023