ЧЕБЫШЕВСКИЙ СБОРНИК

Том 21. Выпуск 3.

УДК 51-74

DOI 10.22405/2226-8383-2020-21-3-292-305

**Разработка математического комплекса моделирования
процесса разрушения композиционных конструкций на основе
высокоскоростных моделей деформирования**

Г. М. Журавлев, В. Г. Теличко, Н. С. Куриен, А. Е. Гвоздев, О. В. Кузовлева

Геннадий Модестович Журавлев — доктор технических наук, профессор, профессор, Тульский государственный университет (г. Тула).

e-mail: technology@tsput.ru

Виктор Григорьевич Теличко — кандидат технических наук, доцент, Тульский государственный университет (г. Тула).

e-mail: katranv@yandex.ru

Никита Сергеевич Куриен — аспирант, Тульский государственный университет (г. Тула).

e-mail: kyrien@mail.ru

Александр Евгеньевич Гвоздев — доктор технических наук, профессор, профессор, Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого (г. Тула).

e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru

Ольга Владимировна Кузовлева — кандидат технических наук, доцент, доцент, Российский государственный университет правосудия (г. Москва).

e-mail: kusovleva@yandex.ru

Аннотация

На сегодняшний день существует риск разрушения для большого количества зданий от различных аварийных ситуаций. Современная нормативная база проектирования и эксплуатации зданий, содержит многолетний опыт анализа причин обрушения, учитывает большое количество воздействий на конструкции (динамические нагрузки, климатические воздействия, временные и постоянные) в течении всего срока службы. Однако возрастающее количество аварий, с разной степенью разрушений, как отдельных частей, так и всего строения, говорит о том, что воздействие, вызвавшее разрушение, не было учтено в нормативных документах, на основании которых был спроектирован объект. Поэтому возникает необходимость в точных расчетных алгоритмах, современных надежных и экономически выгодных методиках по конструктивному усилению несущих каркасов зданий.

В статье рассмотрены существующие методы, для прогнозирования эффектов разрушения и решения задач на определение напряженно-деформированного состояния исходя из специально разработанной модели прочности RHT (Riedel-Hiermaier-Thoma) для высокоскоростного деформирования железобетона в условиях динамического нагружения. Рассмотрена модельная задача с использованием вариационного подхода, основанного на построении функционала расчета мощности упругой деформации с учетом мощности сил инерции для заряда взрывчатого вещества сферической формы, расположенного непосредственно перед сооружением. Все расчеты производились в среде ANSYSLS-DYNA, получены результаты в форме графиков скоростей деформаций и полей напряжений.

Ключевые слова: динамическое нагружение, напряженно-деформированное состояние, взрывчатые вещества, энергетический метод, метод конечных элементов, железобетон.

Библиография: 22 названия.

Для цитирования:

Г. М. Журавлев, В. Г. Теличко, Н. С. Куриен, А. Е. Гвоздев, О. В. Кузовлева. Разработка математического комплекса моделирования процесса разрушения композиционных конструкций на основе высокоскоростных моделей деформирования // Чебышевский сборник, 2020, т. 21, вып. 3, с. 292–305.

CHEBYSHEVSKII SBORNIK

Vol. 21. No. 3.

UDC 51-74

DOI 10.22405/2226-8383-2020-21-3-292-305

The development of a mathematical complex for modeling the progress of destruction of composite structures based on high-speed deformation models

G. M. Zhuravlev, V. G. Telichko, N. S. Kurien, A. E. Gvozdev, O. V. Kuzovleva

Gennady Modestovich Zhuravlev — doctor of technical Sciences, Professor, Professor, Tula State University (Tula).

e-mail: technology@tspu.ru

Victor Grigorievich Telichko — candidate of technical Sciences, associate Professor, Tula State University (Tula).

e-mail: katranv@yandex.ru

Nikita Sergeevich Kurien — post-graduate student, Tula State University (Tula).

e-mail: kyrien@mail.ru

Alexandr Evgenievich Gvozdev — doctor of engineering, Professor, Professor, Tula State Pedagogical University L.N. Tolstoy (Tula).

e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru

Olga Vladimirovna — candidate of technical Sciences, docent, docent, Russian State University of justice (Moscow).

e-mail: kusovleva@yandex.ru

Abstract

Today, there is a risk of destruction for a large number of buildings from various emergencies. Modern regulatory framework for the design and operation of buildings, contains many years of experience in analyzing the causes of collapse, takes into account a large number of impacts on structures (dynamic loads, climatic effects, temporary and permanent) during the entire service life. However, the increasing number of accidents with varying degrees of destruction, both of individual parts and of the entire structure, suggests that the impact that caused the destruction was not taken into account in the regulatory documents on the basis of which the object was designed. Therefore, there is a need for accurate calculation algorithms, modern reliable and cost-effective methods for the structural strengthening of supporting frames of buildings.

The article considers existing methods for predicting the effects of fracture and solving problems for determining the stress-strain state based on a specially developed RHT (Riedel-Hiermaier-Thoma) strength model for high-speed deformation of reinforced concrete under dynamic loading conditions. A model problem is considered using a variational approach based on the construction of a functional for calculating the elastic deformation power, taking into account the power of inertia forces for a spherical explosive charge located directly in front of the structure. All calculations were performed in the ANSYSLS-DYNA environment, the results were obtained in the form of graphs of strain rates and stress fields.

Keywords: dynamic loading, stress-strain state, explosives, energy method, finite element method, reinforced concrete.

Bibliography: 22 titles.

For citation:

G. M. Zhuravlev, V. G. Telichko, N. S. Kurien, A. E. Gvozdev, O. V. Kuzovleva, 2020, "The development of a mathematical complex for modeling the progress of destruction of composite structures based on high-speed deformation models", *Chebyshevskii sbornik*, vol. 21, no. 3, pp. 292–305.

1. Введение

На сегодняшний день существует риск разрушения для большого количества зданий от различных аварийных ситуаций, в связи с развитием взрывоопасных отраслей промышленности, что выдвигает ответственную и сложную задачу охраны населения, обслуживающего персонала и окружающей среды от аварий [3, 5]. Современная нормативная база проектирования и эксплуатации зданий, содержит многолетний опыт, анализа причин обрушения, учитывает большое количество воздействий на конструкции (динамические нагрузки, климатические воздействия, временные и постоянные) в течение всего срока службы. Однако возрастающее количество аварий, с разной степенью разрушений, как отдельных частей, так и всего строения, говорит о том, что воздействие, вызвавшее разрушение, не было учтено в нормативных документах, на основании которых был запроектирован объект. Первостепенное значение приобретает анализ возможных отклонений от нормальных эксплуатационных режимов на данных производствах и тщательное изучение возможного развития различных аварийных ситуаций, приводящих к динамическим воздействиям на сооружения [5, 7, 9].

Стратегия борьбы с взрывами и реализация мер по смягчению последствий взрыва требуют внимания и решения, начиная с этапов планирования и проектирования опасного производственного объекта, поскольку впоследствии, при эксплуатации, решение данных задач становится либо трудным, либо невозможным. В настоящий момент существуют два пути уменьшения последствий воздействия взрыва: разработка взрывоустойчивой конструкции зданий и сооружений на вновь проектируемых или реконструируемых объектах; создание универсального защитного устройства, способного эффективно снизить интенсивность падающей ударной волны и удовлетворить требованиям по его размещению в условиях существующей плотной застройки на опасных объектах [10, 18, 22]. В обоих случаях для строительства конструкции, устойчивой к взрывам, изначально необходимо определить величину взрывной нагрузки, которую может выдержать конструкция.

Методы, доступные для прогнозирования эффектов взрыва, можно сгруппировать по трем основным категориям: эмпирические (или аналитические), полуэмпирические и численные (первого порядка). Эмпирические подходы разрабатываются на основе обширного анализа огромного объема экспериментальных данных, собранных в течение длительного периода времени [13, 14]. Таким образом, они ограничены объемом экспериментальной базы данных. Кроме того, хорошо известно, что эмпирические уравнения не дают точных результатов при рассмотрении ближайшей от источника взрыва зоны действия ударной волны. Полуэмпирические подходы основаны на упрощенных моделях физики явлений [3, 4, 5, 6]. В них основное внимание уделяется моделированию физических процессов в значительно упрощенном виде. Этот подход в основном зависит от обширных данных и тематических исследований, а точность, как правило, выше, чем та, которая обеспечивается эмпирическим подходом. Численный метод (первого порядка) включает совокупность физических, математических и численных методов, предназначенных для вычисления характеристик потоковых процессов. В этих методах математические функции описывают законы сохранения массы, импульса и энергии. Динамическое

поведение материалов при этом выражено эмпирическими зависимостями, полученными на основе экспериментов, проведенных на этих материалах [1, 11]. Под эту категорию подпадают методы: конечных элементов (англ. Finite Element Method), конечных разностей (англ. Finite difference Method) и граничных элементов (англ. Boundary Element Method) [2, 6, 15].

В связи с этим нахождение условий разрушения элементов строительных конструкций динамическим нагружением, с использованием метода, доступного для прогнозирования эффектов взрыва, в контексте с применением современных программных комплексов основанных на методе конечных элементов (КЭ) представляет собой актуальную задачу, особенно в прикладном плане.

2. Материалы и методы исследования

В данной работе для описания прочности конструкции будем использовать модель RHT — моделью прочности (Riedel-Hiermaier-Thoma) [20], разработанной специально для высокоскоростного деформирования железобетона. Данная модель является модульной и описывает поведение упругопластического тела с упрочнением и широко применяется в современных комплексах САПР [16]. Ниже дано краткое описание математических основ модели RHT [11, 20].

Рис. 1: Предельная нагрузка материала и его разгрузка

Модель прочности RHT выражается в терминах трех предельных поверхностей напряжений: начальной упругой поверхности текучести (yieldsurface), поверхности разрушения (failuresurface) и остаточной поверхности (residualsurface). В то время как поверхности учитывают снижение прочности вдоль различных меридианов, а также влияние скорости деформации, статические сжимающие меридианные поверхности изображены на рис. 1.

Поверхность разрушения, то есть предел прочности бетона, формируется из параметров материала, включая прочность бетона на сжатие, растяжение и сдвиг. Начальная поверхность текучести формируется из введенных пользователем параметров поверхности разрушения вдоль меридиана растяжения и сжатия и дополнительно включает в себя предел давления закрытия пор. Модель является упругой до тех пор, пока напряжение не достигнет начальной поверхности текучести, за которой развиваются пластические деформации. Пластические деформации вместе со свойствами упрочнения бетона, заданными в качестве входных данных, используются для формирования эффективной поверхности текучести путем интерполяции между исходной поверхностью текучести и поверхностью разрушения. Аналогично,

когда напряжение достигает поверхности разрушения, используется параметризованная модель повреждения, которая управляет эволюцией разрушения, обусловленной пластическими деформациями, которая, в свою очередь, представляет собой предельную поверхность напряжения после разрушения путем интерполяции между поверхностью разрушения и остаточной поверхностью. Для полностью поврежденного материала нет зависимости от меридиана или скорости деформации, а прочность на сдвиг поддерживается только в ограниченных условиях, т.е. при положительных давлениях.

RHT модель использует модель объемного уплотнения [17]. Схематическое описание модели представлено на рис. 2, где важную роль играют давление закрытия пор и давление уплотнения. Пористое уплотнение начинается при значении давления, соответствующем давлению закрытия пор, ниже которого модель является упругой. При инициировании коллапса пор наблюдается значительное снижение эффективного объемного модуля упругости, так как связанные с этим микромеханические эффекты снижают объемную жесткость материала. Внутренняя переменная α представляет пористость материала, как долю между плотностью матрицы материала и пористым бетоном, и, таким образом, уменьшается с увеличением давления и делает процесс нагружения необратимым. Разгрузка происходит по текущей упругой жесткости и приведет к постоянной объемной деформации при нулевом давлении, последующий новый этап загрузки происходит по кривой разгрузки. Когда давление достигает давления закрытия пор, материал считается полностью уплотненным ($\alpha = 1$) и будет описываться обычными уравнениями состояния для бетона.

Рис. 2: Схематическое описание p - α уравнения состояния

Здесь p — величина давления, ε_{vol} — объемная деформация, α — коэффициент пористости.

В модели RHT часть сдвиг и давление связаны, причем давление описывается в форме уравнения Ми-Грюнейзена [21, 22] с полиномиальной кривой Гюгоньо и отношением уплотнения p - α (рис. 2). Для модели уплотнения мы определяем переменную, представляющую собой пористость α , которая меняется в диапазоне от 0 до 1. Эта переменная представляет собой текущую долю плотности между материалом матрицы и пористым бетоном, и будет уменьшаться с увеличением давления. Эволюция этой переменной задается как [20]

$$\alpha(t) = \max \left(1, \min \left(\alpha_0, \min_{s \leq t} \left(1 + (\alpha_0 - 1) \left[\frac{p_{comp} - p(s)}{p_{comp} - p_{el}} \right]^N \right) \right) \right),$$

где $p(t)$ — величина давления, t — время. Это выражение также включает начальное давление закрытия пор p_{el} , давление уплотнения p_{comp} и экспоненциальный показатель пористости N . Для дальнейшего использования мы определим предельное давление, или текущее давление

закрытия пор материала, как [20]

$$p_c = p_{comp} - (p_{comp} - p_{el}) \left[\frac{\alpha - 1}{\alpha_0 - 1} \right]^{1/N}.$$

Остаточная часть давления дана в терминах плотности и удельной внутренней энергии. В зависимости от параметров определяющих соотношений для материала ($B_0 > 0$):

$$p(\rho, e) = \frac{1}{\alpha} \begin{cases} (B_0 + B_1\eta)\alpha\rho e + A_1\eta + A_2\eta^2 + A_3\eta^3, & \eta > 0, \\ B_0\alpha\rho e + T_1\eta + T_2\eta^2, & \eta < 0 \end{cases}$$

или при ($B_0 = 0$):

$$p(\rho, e) = \Gamma\rho e + \frac{1}{\alpha}p_H(\eta) \left[1 - \frac{1}{2}\Gamma\eta \right],$$

$$p_H(\eta) = A_1\eta + A_2\eta^2 + A_3\eta^3,$$

совместно с

$$\eta(\rho) = \frac{\alpha\rho}{\alpha_0\rho_0} - 1.$$

Для описания прочности на сдвиг используем следующее выражение:

$$p^* = p/f_c,$$

где давление нормализовано с параметром прочности на сжатие. Также используем s для обозначения тензора девиатора напряжений и $\dot{\epsilon}_p$ для скорости пластической деформации.

Для заданного НДС и скорости нагружения упругопластическая поверхность текучести для модели RHT задается следующим образом [20]:

$$\sigma_y(p^*, s, \varepsilon_p, \varepsilon_p^*) = f_c \sigma_y^*(p^*, F_r(\varepsilon_p, p^*), \varepsilon_p) R_3(\theta, p^*),$$

которая и является композицией двух функций и параметра прочности на сжатие f_c . Первая описывает зависимость давления для главных напряжений ($\sigma_1 < \sigma_2 = \sigma_3$) и выражается через поверхность разрушения и нормализованную пластическую деформацию как

$$\sigma_y^*(p^*, F_r, \varepsilon_p^*) = \sigma_f^* \left(\frac{p^*}{y}, F_r \right) y, \text{ где } y = \varepsilon_p^* + 1(1 - \varepsilon_p^*) F_e F_c.$$

Поверхность разрушения задается как [19]:

$$\sigma_f^*(p^*, F_r) = \begin{cases} A(p^* - F_r/3 + (A/F_r)^{-1/n})^n & 3p^* \geq F_r \\ F_r f_s^*/Q_1 + 3p^*(1 - f_s^*/Q_1) & F_r > 3p^* \geq 0 \\ F_r f_s^*/Q_1 - 3p^* \left(1/Q_2 - \frac{f_s^*}{Q_1 f_t^*} \right) & 0 > 3p^* \geq 3p_t^* \\ 0 & 3p_t^* > 3p^* \end{cases},$$

где $p_t^* = \frac{F_r Q_2 f_s^* f_t^*}{3(Q_1 f_t^* - Q_2 f_s^*)}$ критическое давление, F_r — множитель динамического роста давления и

$$Q_1 = R_3(\pi/6, 0) \quad Q_2 = Q(p^*).$$

В этих выражениях f_t^* и f_s^* представляют собой прочность бетона на растяжение и сдвиг относительно прочности на сжатие f_c , и значения Q вводятся для учета меридианной зависимости растяжения и сдвига.

Для описания пониженной прочности на сдвиг и растяжение введем следующее обозначение:

$$R_3(\theta, p^*) = \frac{2(1 - Q^2) \cos \theta + (2Q - 1) \sqrt{4(1 - Q^2) \cos^2 \theta + 5Q^2 - 4Q}}{4(1 - Q^2) \cos^2 \theta + (1 - 2Q)^2},$$

где θ — угол Лодэ получен из тензора девиатора напряжений s [21]:

$$\cos 3\theta = \frac{27 \det(s)}{2\bar{\sigma}(s)^3} \quad \bar{\sigma}(s) = \sqrt{\frac{3}{2} s : s}.$$

Максимальная потеря прочности описывается как функция относительного давления:

$$Q = Q(p^*) = Q_0 + Bp^*.$$

Окончательно, зависимость скорости деформации определяется как [20]:

$$F_r(\varepsilon_p, p^*) = \begin{cases} F_r^c & 3p^* \geq F_r^c \\ F_r^c - \frac{3p^* - F_r^c}{F_r^c + F_r^t f_t^*} (F_r^t - F_r^c) & F_r^c > 3p^* \geq -F_r^t f_t^* \\ F_r^t & -F_r^t f_t^* > 3p^* \end{cases},$$

где

$$F_r^{c/t}(\varepsilon_p) = \begin{cases} \left(\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_p^{c/t}} \right)^{\beta_{c/t}} & \varepsilon_p \leq \varepsilon_p^{c/t} \\ y_{c/t} \sqrt[3]{\varepsilon_p} & \varepsilon_p > \varepsilon_p^{c/t} \end{cases}.$$

Параметры, используемые в этих выражениях, задаются как:

$$\beta_c = \frac{4}{20 + 3f_c} \quad \beta_t = \frac{2}{20 + f_c},$$

где $y_{c/t}$ — определяется из условий непрерывности [20].

Тогда, как предел поверхности текучести представлен:

$$F_c(p^*) = \begin{cases} 0 & p^* \geq p_c \\ \sqrt{1 - \left(\frac{p^* - p_u^*}{p_c^* - p_u^*} \right)} & p_c > p^* \geq p_u^* \\ 1 & p_u^* > p^* \end{cases},$$

где

$$p_c^* = \frac{p_c}{f_c} \quad p_u^* = \frac{F_r^c g_c^*}{3} + \frac{G^* \varepsilon_p}{f_c}.$$

Упрочнение описывается линейно по отношению к пластической деформации, где

$$\varepsilon_p^* = \min \left(\frac{\varepsilon - p}{\varepsilon_p^h}, 1 \right) \quad \varepsilon_p^h = \frac{\sigma_y(p^*, s, \varepsilon_p, \varepsilon_p^*)(1 - FeFc)}{y3G^*}$$

здесь

$$G^* = \xi G,$$

где G — модуль сдвига исходного материала, а ξ — понижающий фактор, отражающий упрочнение.

Когда упрочнение достигает предела прочности бетона на поверхности разрушения, повреждения накапливаются при дальнейшем неупругом нагружении, контролируемой пластической деформацией. Пластическая деформация при разрушении определяется как [20]:

$$\varepsilon_p^f = \begin{cases} D_1(p^* - (1-D)p_t^*)^{D_2} & p^* \geq (1-D)p_t^* + \left(\frac{\varepsilon_p^m}{D-1}\right)^{1/D_2} \\ \varepsilon_p^m & (1-D)p_t^* + \left(\frac{\varepsilon_p^m}{D_1}\right)^{1/D_2} > p^* \end{cases}$$

с Параметр повреждения при пластическом деформировании определяется в соответствии

$$D = \int_{\varepsilon_n^h}^{\varepsilon_p} \frac{d\varepsilon_p}{\varepsilon_p^f},$$

и полученная поверхность разрушения дана как:

$$\sigma_d(p^*, s, \varepsilon_p) = \begin{cases} \sigma_y(p^*, s, \varepsilon_p, 1)(1 - D) + Df_c\sigma_r^*(p^*) & p^* \geq 0 \\ \sigma_y(p^*, s, \varepsilon_p, 1)\left(1 - D - \frac{p^*}{p_t^*}\right) & (1 - D)p_t^* \leq p^* < 0 \end{cases},$$

где $\sigma_r^*(p^*) = A_f(p^*)^{n_f}$.

Для демонстрации работы, приведенной выше модели, была решена задача о расчете взрывозащитного сооружения показанного на рис. 3-4. Решение выполнено на базе LS-DYNA из пакета ANSYS, [8, 12] где реализована модель RHT. Материалом конструкции принимался бетон с прочностью 35 МПа, величина заряда 1,4 кг в тротиловом эквиваленте [19].

Рис. 3: Вид конструкции сбоку

Рис. 5: Общий вид расчетной модели и разбиение на КЭ

нейность материалов, а также сложную конфигурацию сооружений и расположение внешней нагрузки.

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баженов Ю.М. Бетон при динамическом нагружении. М.: Стройиздат, 1970. 271 с.
2. Бате К. Численные методы анализа и метод конечных элементов / К. Бате, Е. Вилсон. М.: Стройиздат, 1982. 448 с.
3. Бирбраер А. Н., Роледер А. Ю. Экстремальные воздействия на сооружения. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. 594 с.
4. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы / Р. Галлагер. М.: Мир, 1984. 428 с.
5. Козлитин А. М., Попов А. И., Козлитин П. А. Теоретические основы и практика анализа техногенных рисков. Вероятностные методы количественной оценки опасностей техносферы. Саратов: СГТУ, 2002. 178 с.
6. Дегтярев Д. В., Лисанов М. В., Сумской С. И., Швыряев А. А. Количественный анализ риска при обосновании взрывоустойчивости зданий и сооружений // Безопасность труда в промышленности, 2013, № 6. С. 82–89.
7. Мартынюк В. Ф. Лекции по теории горения и взрыва: учеб. пособие. М.: Изд. центр РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2014. 184 с.
8. Журавлев Г. М., Куриен Н. С. Математическое моделирование взрывного воздействия неконтактного заряда на изотропную бетонную плиту // Тезисы 20-ой Международной научно-технической конференции «АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СТРОИТЕЛЬСТВА, СТРОИТЕЛЬНОЙ ИНДУСТРИИ И АРХИТЕКТУРЫ». Тула, 2019. С. 194–197.

Рис. 6: Результаты расчета перемещений (деформированная схема), мм

9. Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей: рук. по безопасности: приказ Ростехнадзора от 31 марта 2016 г. № 137. Сер. 27. Вып. 15. М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2016. 44 с.
10. Методы обоснования взрывоустойчивости зданий и сооружений при взрывах топливно-воздушных смесей на опасных производственных объектах: рук. по безопасности: приказ Ростехнадзора от 13 мая 2015 г. № 189. Сер. 27. Вып. 17. М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2016. 78 с.
11. Невская Е. Е., Глебова Е. В. Анализ способов и средств повышения уровня защиты зданий и сооружений от действия ударных волн // Безопасность труда в промышленности. 2017. № 2. С. 73–78.
12. Журавлев Г. М., Куриен Н. С. Постановка задачи математического моделирования взрывостойкости и гарантированного разрушения пластин взрывной нагрузкой // Научно-технический журнал. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии Изд-во ОГУ им. И. С. Тургенева г. Орел, № 2. 2017, С 56–63.
13. Расторгуев Б. С., Плотников А. И., Хуснутдинов Д. З. Проектирование зданий и сооружений при аварийных взрывных воздействиях. М.: Изд-во АСВ, 2007. 152 с.
14. Ефремов К. В., Лисанов М. В., Софьин А. С. и др. Расчет зон разрушения зданий и сооружений при взрывах топливно-воздушных смесей на опасных производственных объектах // Безопасность труда в промышленности. 2011. № 9. С. 70–77.
15. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов М.: Мир, 1979. 392 с.
16. Агапова Е. А., Дегтярев Д. В., Лисанов М. В. и др. Сравнительный анализ российских и зарубежных методик и компьютерных программ по моделированию аварийных выбросов и оценке риска // Безопасность труда в промышленности. – 2015. – № 9. – С. 71–78.

Рис. 7: Результаты расчета напряжений в плите, МПа

Рис. 8: График изменения максимального давления в конструкции, МПа

17. Физика взрыва / Под ред. Л.П. Орленко. Изд. 3-е, переработанное. В 2 т. Т.1. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. 832 с.
18. American Society of Civil Engineers «Design of blast resistant buildings in petrochemical facilities». New York, 2010. 318 p.
19. Moxnes J. F. et al. (2014) Experimental and numerical study of the fragmentation of expanding warhead casings by using different numerical codes and solution technics. Defence Technology, vol. 10, pp. 161-176.
20. Riedel W., Thoma K., Hiermaier S. Schmolinske E. (1999) Penetration of reinforced concrete by BETA-B-500. Numerical analysis using a new macroscopic concrete model for hydrocodes. Proceeding of 9th international symposium on interaction of the effects of munitions with structures. Berlin, pp. 315-322.
21. Tham C. Y. (2005) Reinforced concrete perforation and penetration simulation using Autodyn 3D. Finite Elements in Analysis and Design, vol. 41, pp. 1401-1410.

Рис. 9: График изменения максимального значения перемещений, с

22. Uddin N. Blast Protection of Civil Infrastructures and Vehicles Using Composites. New York, 2010. 488 p.

REFERENCES

1. Bazhenov, Y. M. (1970), *Concrete under dynamic loading*, Moscow, Stroizdat, 271 p.
2. Bate, K., Wilson, E. (1982) *Numerical methods of analysis and the finite element method*, Moscow, Stroizdat, 448 p.
3. Birbraer, A. N., Roleder, A. Yu. (2009) *Extreme impacts on structures*. St. Petersburg: Publishing house of Polytech, UN-TA, 594 p.
4. Gallagher, R. (1984) *Finite element method. Basics*, Moscow, Mir, 428 p.
5. Kozlitin, A. M., Popov, A. I., Kozlitin, P. A. (2002) *Theoretical bases and practice of analysis of technogenic risks. Probabilistic methods for quantifying the dangers of the technosphere*, Saratov, SSTU, 178 p.
6. Degtyarev, D. V., Lisanov, M. V., Sumskey, S. I., Shvyryaev, A. A. (2013), «Quantitative risk analysis in justifying the explosion resistance of buildings and structures», *Labor Safety in industry*, No. 6, pp. 82-89.
7. Martynyuk, V. F. (2014) *Lectures on the theory of combustion and explosion*, Moscow, Russian state University of oil and gas. I. M. Gubkina, 184 p.
8. Zhuravlev, G. M., Kurien N. S., (2019), «Mathematical modeling of the explosive effect of a non-contact charge on an isotropic concrete slab», *Theses of the 20th International scientific and technical conference «ACTUAL PROBLEMS of CONSTRUCTION, CONSTRUCTION INDUSTRY and ARCHITECTURE»*. Tula, 2019, pp. 194-197.
9. Methodology for assessing the consequences of emergency explosions of fuel and air mixtures: safety guide. Rostekhnadzor order №137 of March 31, 2016. Ser. 27. Vol. 15, Moscow, ZAO STC PB, 2016. 44 p.
10. Methods for substantiating the explosion resistance of buildings and structures during explosions of fuel and air mixtures at hazardous production facilities: safety guide: Rostekhnadzor order No. 189 of may 13, 2015, Ser. 27, Vol. 17, Moscow, ZAO STC PB, 2016, 78 pp.

11. Nevskaya, E. E., Glebova, E. V. (2017), «Analysis of ways and means of increasing the level of protection of buildings and structures from the action of shock waves», *Labor Safety in industry*, No. 2. Pp. 73-78.
12. Zhuravlev, G. M., Kurien, N. S. (2017), «Statement of the problem of mathematical modeling of explosion resistance and guaranteed destruction of plates by explosive load», *Scientific and technical journal. Fundamental and applied problems of engineering and technology*, No. 2, pp. 56-63.
13. Rastorguev, B. S., Plotnikov, A. I., Khusnutdinov, D. Z. (2007) *Design of buildings and structures in case of emergency explosive impacts*, Moscow, ASV publishing House, 152 p.
14. Efremov, K. V., Lisanov, M. V., Sofin, A. S., etc. (2011) «Calculation of zones of destruction of buildings and structures during explosions of fuel and air mixtures at hazardous production facilities», *Labor Safety in industry*, No. 9. pp. 70-77.
15. Segerlind, L. (1979) *Application of the finite element method*, Moscow, Mir, 392 p.
16. Agapova, E. A., Degtyarev, D. V., Lisanov, M. V., et al. (2015) «Comparative analysis of Russian and foreign methods and computer programs for modeling emergency emissions and risk assessment», *Labor Safety in industry*, No. 9, pp. 71-78.
17. *Physics of explosion*, Editor Orlenko, L. P., T.1, Moscow, FIZMATLIT, 2002, 832 pp.
18. American Society of Civil Engineers (2010) «Design of blast resistant buildings in petrochemical facilities», New York, 318 p.
19. Moxnes, J.F. et al. (2014) «Experimental and numerical study of the fragmentation of expanding warhead casings by using different numerical codes and solution technics», *Defence Technology*, vol. 10, pp. 161-176.
20. Riedel, W., Thoma, K., Hiermaier, S. Schmolinske, E. (1999) «Penetration of reinforced concrete by BETA-B-500. Numerical analysis using a new macroscopic concrete model for hydrocodes», *Proceeding of 9th international symposium on interaction of the effects of munitions with structures*, Berlin, pp. 315-322.
21. Tham, C.Y. (2005) «Reinforced concrete perforation and penetration simulation using Autodyn 3D», *Finite Elements in Analysis and Design*, vol. 41, pp. 1401-1410.
22. Uddin, N. (2010) *Blast Protection of Civil Infrastructures and Vehicles Using Composites*, New York, 488 p.

Получено 9.04.2020 г.

Принято в печать 22.10.2020 г.