ЧЕБЫШЕВСКИЙ СБОРНИК

Том 20. Выпуск 4.

УДК 519.85:69.059

DOI 10.22405/2226-8383-2019-20-4-408-422

Математическое моделирование разрушения элементов строительных конструкций под действием динамической нагрузки

Г. М. Журавлев, В. Г. Теличко, Н. С. Куриен, А. Е. Гвоздев, Д. В. Малий

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

e-mail: technology@tspu.ru

Теличко Виктор Григорьевич — кандидат технических наук, доцент кафедры строительства, строительных материалов и конструкций, Тульский государственный университет (г. Тула).

e-mail: katranv@yandex.ru

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

e-mail: kyrien@mail.ru

Гвоздев Александр Евгеньевич — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник кафедры технологии и сервиса, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (г. Тула).

e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru

Малий Дмитрий Владимирович — старший преподаватель кафедры технологии и сервиса, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (г. Тула).

e-mail: maliydmiriy@yandex.ru

Аннотация

Развитие современных промышленных производств выдвигает ответственную и сложную задачу охраны населения, обслуживающего персонала и окружающей среды от аварий. 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 и нахождение условий разрушения элементов конструкций. В статье предложена математическая методика нахождения условий разрушения элементов строительных конструкций динамическим нагружением. Для решения динамических задач, используется вариационный подход, основанный на построении функционала расчета мощности упругой деформации с учетом мощности сил инерции, в контексте с применением современных программных комплексов, базирующихся на методе конечных элементов. В качестве примера рассмотрена задача компьютерного моделирования воздействия динамической нагрузки, расположенной над центром железобетонной плиты, позволяющая определять напряженно-деформированное состояние простейших элементов строительных конструкций плит. Все расчеты производились в среде ANSYSLS-DYNA. Получены результаты в форме графиков скоростей деформаций и полей напряжений. Проведено сравнение полученных результатов с аналитическим решением аналогичной задачи, приведенной в работе Г.Т. Володина.

Ключевые слова: динамическое нагружение, функционал мощности упругой деформации, мощность сил инерции, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние, железобетон.

Библиография: 26 названия.

Для цитирования:

Г. М. Журавлев, В. Г. Теличко, Н. С. Куриен, А. Е. Гвоздев, Д. В. Малий Математическое моделирование разрушения элементов строительных конструкций под действием динамической нагрузки // Чебышевский сборник. 2019. Т. 20, вып. 4, С. 408–422.

CHEBYSHEVSKII SBORNIK

Vol. 20. No. 4.

UDC 519.85:69.059

DOI 10.22405/2226-8383-2019-20-4-408-422

Mathematical modeling of structural elements destruction under dynamic load

G. M. Zhuravlev, V. G. Telichko, N. S. Kurien, A. E. Gvozdev, D. V. Maliy

Zhuravlev Gennady Modestovich — Doctor of Technical Sciences, Professor, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula).

e-mail: technology@tsput.ru

Telichko Victor Grigorievich — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction, Building Materials and Structures, Tula State University (Tula).

e-mail: katranv@yandex.ru

Kurien Nikita Sergeevich — Postgraduate Student, Tula State University (Tula).

e-mail: kyrien@mail.ru

Gvozdev Aleksander Evgenievich — Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief researcher of the Chair of Technology and Service, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula).

e-mail: gvozdev.alexandr2013@yandex.ru

Maliy Dmitry Vladimirovich — Senior Lecturer of the Chair of Technology and Service, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula).

e-mail: maliydmity@yandex.ru

Abstract

The development of modern industry puts forward a responsible and complex task of protecting the population, service personnel and the environment from accidents. The analysis of possible deviations from normal operating conditions in these industries and a thorough study of the possible development of various emergency situations that lead to dynamic effects on structures and finding conditions for the destruction of structural elements is of paramount importance. The article proposes a mathematical method for finding the conditions of destruction of structural elements by dynamic loading. To solve dynamic problems, a variational approach is used, based on the construction of a functional for calculating the power of elastic deformation taking into account the power of inertia forces, in the context of using modern software systems based on the finite element method. As an example, the problem of computer modeling of the dynamic load located above the center of the reinforced concrete slab, which allows to determine the stress-strain state of the simplest elements of building structures of plates, is considered. All calculations were performed in ANSYSLS-DYNA environment. The results are obtained in the form of graphs of strain rates and stress fields. The obtained results are compared with the analytical solution of a similar problem presented in the work of G.T. Volodin.

Keywords: dynamic loading, functional capacity of elastic deformation, power of the forces of inertia, finite element method, stress-strain state, reinforced concrete.

Bibliography: 26 titles.

For citation:

G. M. Zhuravlev, V. G. Telichko, N. S. Kurien, A. E. Gvozdev, D. V. Maliy, 2019, "Mathematical modeling of structural elements destruction under dynamic load", *Chebyshevskii sbornik*, vol. 20, no. 4, pp. 408–422.

1. Введение

Развитие ряда современных отраслей промышленности выдвигает ответственную и сложную задачу охраны населения, обслуживающего персонала и окружающей среды от аварий. 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.

При проектировании зданий и сооружений взрывоопасных производств требуется учитывать нагрузку от динамического воздействия согласно СП 20.13330.2011. Однако развернутых разъяснений по определению нагрузок от динамических воздействий в этом нормативном документе нет. В пособиях и различного рода рекомендациях по расчету динамических воздействий представлены упрощенные методики не способные в полной мере описать происходящий процесс и его последствия [1,2].

Обзор известных научных работ указывает на то, что исследования в этой области, являются малочисленными и недостаточно изученными, их неудобно применять при решении практических задач, отсутствуют реализации данных работ в среде современных систем конечно-элементного моделирования, что ставит серьезные барьеры на пути решения прикладных задач. Разработкам в этой области посвящены работы В.Н. Аптукова, А.В. Герасимова, Т.М. Саламахина, Г.Т. Володина, Н.Н. Белова, Н.Т. Югова, Д.Г. Копаницы, М.А. Лебедева, В.А. Рыжанского, А.Г. Иванова, А.К. Перцева, Ю.И. Кадашевича, У. Бейкера, Н.С. Turkmen, W. Riedel, K. Thoma, S. Hiermaier и др.

Среди указанных работ лучшим образом согласуются с экспериментальными данными те из них, в основе которых лежит энергетический метод расчета [3-14]. Однако в них не рассматривается детально механизм разрушения - фиксируется лишь разрушение в опасном сечении, срединной линии, срединного слоя и т.д. Это не позволяет отслеживать возникновение и распространение зон разрушения по всему объему деформируемой конструкции, в зависимости от расположения динамической нагрузки в окружающем пространстве.

В связи с этим нахождение условий разрушения элементов строительных конструкций динамическим нагружением, с использованием усовершенствованной методики расчета динамических задач, основанного на использовании функционала расчет мощности упругой деформации с учетом мощности сил инерции, в контексте с применением современных программных комплексов основанных на методе конечных элементов (КЭ) представляет собой актуальную задачу, особенно в прикладном плане.

2. Материалы и методика исследования

Анализ процессов разрушения элементов строительных конструкций динамическим нагружением, с точки зрения практической реализации показывает, что процесс теоретически, можно представить в виде суммы двух взаимосвязанных задач: внешней, когда рассматривается задача формирования динамической нагрузки, учитывающей энергетические и геометрические характеристики взрывчатого вещества, и внутренней, когда исследуется деформирование и разрушение элементов конструкции динамической нагрузкой. Наибольший интерес представляет исследования упругого формоизменения, происходящего в элементах конструкции, с целью построения решения, которое с учетом критерия прочности позволяет прогнозировать,

возникающее напряженно-деформированное состояние элементов конструкции, а также динамику ее изменения во времени, что дает возможность проследивать образование и развитие участков разрушения.

Для нахождения условий разрушения элементов строительных конструкций предлагается использование усовершенствованной методики расчета динамических задач, основанного на использовании энергетического метода, в контексте с применением современных программных комплексов основанных на методе конечных элементов. Сущность методики рассмотрим на примере действия нагрузки, создаваемой динамическим воздействием на бетонную плиту. Нагрузка должна быть достаточной для того, чтобы пришедшая в движение плита разрушалась при достижении максимального прогиба в первом цикле. Напряженно-деформированное состояние плиты учитываем при помощи классических гипотез Кирхгофа-Лява, вследствие чего, деформированное состояние плиты в целом определяется деформированным состоянием ее среднего слоя. Граничные условия, заданные по контуру неизменны на протяжении всего процесса деформирования, и соответствуют способу ее закрепления (опирание плиты по контуру шарнирное).

Заданная динамическая нагрузка действует на центр плиты и находится в ближайшей области действия, поэтому давлением окружающей среды можно пренебречь. Распределение удельного импульса, создаваемого динамической нагрузкой, по поверхности плиты определяется функцией [4, 7, 15]

$$I = I_N i_T \quad (1)$$

где i_N – нормальная составляющая, i_T – тангенциальная составляющая удельной динамической нагрузки.

Тангенциальной составляющей удельного импульса можно пренебречь, в предположении, что поверхность плиты является в достаточной степени гладкой. Поэтому, расчет удельного импульса динамической нагрузки будем проводить только с учетом нормальной составляющей.

Для материала плиты принимаются гипотезы о его сплошности, однородности и изотропности. В любой момент времени при деформировании, вплоть до разрушения, материал плиты считаем упругим и подчиняющимся закону Гука, то есть рассматриваем хрупкое разрушение. При этом под разрушением плиты понимаем утрату ее несущей способности вследствие появления в ней трещин, сколов или разделения на фрагменты. Изменение прочностных характеристик материала плиты при высокоскоростном деформировании при нормальной температуре не учитываем. Тепловыми потерями, распространения деформационных волн в материале пластины и затухающей составляющей в векторе перемещений точек среднего слоя плиты пренебрегаем.

Моделирование физических процессов динамического воздействия, находящегося в ближайшей области действия к плите рассмотрим в некоторый определенный момент времени. Используем энергетический метод Т.М. Саламахина, согласно которому кинетическая энергия, полученная преградой от импульсной нагрузки, полностью расходуется на работу деформирования вплоть до разрушения [4].

$$\mathcal{E} = \Pi \quad (2)$$

Т.М. Саламахин показал [4], что нормальная составляющая удельного импульса динамической нагрузки, действующая на элемент преграды, может быть вычислена, с учетом отражения продуктов нагружения и деформирования поверхности бетонной плиты, по формуле:

$$i = \int_0^{\tau} P(t) dt \quad (3)$$

Рис. 1: Расчётная схема

где $P(t)$ — давление продуктов динамического воздействия на плиту, t — время, отсчитываемое от момента столкновения первой частицы потока продуктов динамического воздействия с плитой в точке с координатами (x, y) показана на рис. 1.

В расчете используем прямоугольную декартову систему координат, оси Ox и Oy поместим в плоскость плиты, ближней к расположению заряда, ось Oz направим вертикально вниз, начало координат поместим в центре плиты.

Кинетическая энергия $d\mathcal{E}$, полученная элементом плиты, согласно импульсному характеру действующей нагрузки, вычисляется по формуле [4]:

$$d\mathcal{E} = \frac{i^2}{2m} = \frac{A_0^2 C^2 z_*^4}{2\rho h [z_*^2 + (x - x_*)^2 + (y - y_*)^2]^4} \quad (4)$$

где ρ — плотность материала плиты, — обобщенная характеристика заряда (литой тротил = 400 м/с), C — масса заряда.

Кинетическая энергия, полученная плитой, за время действия динамического воздействия нагрузки определяется по формуле, полученной Г.Т. Володиным [6-8]:

$$\mathcal{E} = \frac{A_0^2 C^2 z_*^4}{2\rho h} \int_{-a}^a \int_{-b}^b \frac{dx dy}{[z_*^2 + (x - x_*)^2 + (y - y_*)^2]^4} \quad (5)$$

Выражение для нахождения работы упругого деформирования, имеет вид

$$\Pi = E \frac{hab}{2(1 - \mu^2)} \int_t dt (P(u, v, w)) \quad (6)$$

где E — модуль Юнга, — коэффициент Пуассона, h — толщина плиты, a и b половина ширины и длины плиты, $P(u, v, w)$ — функционал расчет мощности упругой деформации для динамического нагружения, определяется по формуле, приведенной в работах В. Новацкого [16, 17]:

$$P(u, v, w) = \int_V \sigma_{ij} \delta \varepsilon_{ij} dV - \int_V \rho \delta u_i u_i dV, \quad (7)$$

Рис. 2: Предельная поверхность для бетона

где $\int_V \sigma_{ij} \delta \varepsilon_{ij} dV$ – мощность упругой деформации, $\int_V \rho \delta u_i \ddot{u}_i dV$ – мощность сил инерции.

Критерий прочности примем в виде [15]:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= -\frac{Ez}{1-\mu^2} \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right); \\ \sigma_y &= -\frac{Ez}{1-\mu^2} \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \right); \end{aligned} \quad (8)$$

где $\frac{\sigma_{\max}}{R_b K_{\nu b}} \leq 1$ – критерий прочности;

$$K_{\nu b} = 1,58 - 0,35 \log_{10} t + 0,07 (\log_{10} t)^2 \quad (\text{см. рис. 2}). \quad (9)$$

На основе изложенного выше подхода Г.Т. Володина и Т.М. Саламахина [4, 6-8] была решена задача деформирования плиты под действием сферического заряда (рис. 3). Исходные данные принимались следующие: размеры плиты: $a = 2$ м; $b = 2$ м; толщина $h = 0,15$ м; бетон тяжелый В25; координаты расположения заряда – $z^* = 0,8$ м; $x^* = 1$ м; $y^* = 1$ м; начальная скорость распространения продуктов взрыва – $A_0 = 400$ м/с; плотность – $\rho = 1620$ кг/м³; модуль Юнга $E = 38000$ МПа; предел прочности – $\sigma_{\max} = 26,3$ МПа.

Получено следующее решение – максимальный прогиб $w = 3,2$ мм; масса заряда, приводящего к разрушению $C = 1,4$ кг.

Далее авторами проведена верификация проведенного расчета в среде ANSYS с помощью метода конечных элементов (рис. 4).

Одним из перспективных методов изучения механизма разрушения динамическим нагружением является применение математического моделирования, в основе которого положен метод конечных элементов (МКЭ). В настоящее время МКЭ – один из наиболее разработанных методов, позволяющих моделировать явления и процессы с максимальным их приближением к реальности. Теоретические основы МКЭ хорошо освещены в работах зарубежных исследователей, среди которых стоит отметить труды К.-Ю. Бате, Е. Вилсона, Р. Галлагера, О. Зенкевича, Л. Сегерлинда и др. [18-22].

Применение средств численного моделирования позволяет исследовать процессы и явления, изучение которых на практике, в силу тех или иных причин, не представляется возможным или экономически нецелесообразно, а также минимизировать затраты, уточнять теорию,

Рис. 3: Модель пример

проверять выводы и получать более полное наглядное представление о сути происходящих явлений.

Несмотря на всю развитость математического аппарата и компьютерных технологий, на сегодняшний день существует не так много верифицированных программных продуктов, позволяющих с высокой степенью достоверности моделировать процессы, происходящие при динамическом нагружении.

Лидером в области разработки программных решений является компания ANSYS с программными продуктами LS-DYNA и AUTODYN. В настоящей работе для моделирования процесса динамического разрушения плиты использовалось лицензионное программное обеспечение системы инженерного анализа ANSYS – LS-DYNA.

Разработка модели разрушения плиты в ANSYSLS-DYNA велась по ряду причин:

компания ANSYS является одним из мировых лидеров в области компьютерного моделирования, в основе которого положен метод конечных элементов, а её пользовательские продукты являются хорошо верифицированными в различных отраслях производства (в том числе такими признанными на международном уровне учреждениями как RAACH) и находят свое применение на многих передовых предприятиях промышленности и научных учреждениях;

LS-DYNA является относительно простым в освоении, а его пользовательский интерфейс дает возможность в сжатые сроки редактировать элементы модели и получать наглядные результаты;

среди аналогов модулю LS-DYNA практически нет равных по расчетным возможностям, которые наиболее полно, при всех прочих равных условиях, отражают физику исследуемого явления, что многократно подтверждено накопленным мировым опытом в использовании данного продукта [23, 24].

Вычисление функционалов проводим с использованием программного модуля LS-DYNA, представляющего многоцелевой конечно-элементный комплекс, предназначенный для анализа высоко нелинейных и быстротекущих процессов в задачах механики твердого и жидкого тела. LS-DYNA представляет возможность эффективного численного моделирования высоко нелинейных термомеханических процессов. Численное моделирование актуально для материала, имеющего разную гетерофазную структуру.

В работе осуществлен расчет бетонной плиты из изотропного материала имеющего $E=38000$ МПа – модуль Юнга, $\nu = 0,2$ - коэффициент Пуассона. Расчет проводится с целью сравнения полученных численных результатов с результатами, полученными в работах Г.Т. Володина [6-8] на предмет проверки адекватности работы программы.

Рис. 4: КЭ модель решаемой задачи

Прочность плиты описывается моделью RHT – моделью прочности (Riedel-Hiermaier-Thoma), разработанной специально для высокоскоростного деформирования железобетона. Данная модель является модульной, и описывает поведение упругопластического тела с упрочнением. В связи с громоздкостью математических выкладок, в настоящей работе не представляется возможным привести полное описание модели. Данная модель полно описано в работах авторов [25, 26].

На рис. 5-7 показана схема деформированной плиты и график перемещения характерных точек (мм) во времени (с).

В результате компьютерного моделирования установлено:

1 – максимальный прогиб пластины в соответствии с подходом Т.М. Саламахина / Г.Т. Володина $w=3,21$ мм.

2 – Максимальный прогиб, полученный с помощью конечно-элементного моделирования в программном комплексе LS-DYNA $w=2,94$ мм.

Проведено сравнение величины прогиба, полученного и в работе по методике расчета Г.Т. Володина, расхождение составило 0,27 мм или менее 10%, что подтверждает адекватность работы программы и подтверждает правильность выбора математического обеспечения для автоматизации расчетов.

Таким образом можно сделать вывод, что нахождение условий разрушения элементов строительных конструкций динамическим нагружением выполнено, с использованием усовершенствованной методики расчета динамических задач, основанного на использовании функционала мощности упругой деформации с учетом мощности сил инерции, в контексте с применением современных программных комплексов, основанных на методе конечных элементов, что позволяет проводить расчеты и математическое моделирование влияния различных факторов при разработке новых конструкций, работающих в условиях динамического нагружения.

Рис. 5: Общий вид схемы

Рис. 6: Вид сверху и характерные точки для плиты

Рис. 7: График перемещений в зависимости от времени для центра плиты

Рис. 8: Конструктивная схема с армированием

В качестве примера далее в развитии предлагаемого подхода, осуществлен расчет железобетонной плиты (рис. 8), состоящей из металлического арматурного каркаса (арматуры) имеющего $E=260000$ МПа – модуль Юнга, $\nu = 0,3$ – коэффициент Пуассона, и бетона, имеющего $E=38000$ МПа – модуль Юнга, $\nu = 0,2$ – коэффициент Пуассона.

На рис. 9-10 показана деформированная схема плиты, в том числе отдельно для арматуры.

На рис. 11 показаны графики перемещения характерных точек (мм) во времени (с).

3. Заключение

Основные научные и практические результаты заключаются в следующем.

Найдены условия разрушения элементов строительных конструкций динамическим нагружением, с использованием усовершенствованной методики расчета динамических задач. Методика основана на расчете функционала мощности упругой деформации с учетом сил инерции и критерия прочности, что позволяет прогнозировать возникающее напряженно-деформированное состояние элементов конструкции, динамику ее изменения во времени и дает возможность анализировать образование и развитие очагов разрушения.

Применением современных программных комплексов (поставленных совместно с ANSYS программное обеспечения LS-DYNA), основанных на методе конечных элементов обеспечивает надежные и достоверные результаты, повышает уровень автоматизации проводимых расчетов, улучшает эффективности работы инженеров-строителей при проектировании сооружений. Установлено, что программный комплекс LS-DYNA в сочетании с моделью бетона RHT в отличие от существующих теоретических моделей, позволяет легко и эффективно учитывать различные дополнительные факторы, такие как армирование и физическую нелинейность материалов, а также сложную конфигурацию сооружений и расположение внешней динамической нагрузки.

Рис. 9: Деформированная схема плиты с учетом арматуры в плане

Рис. 10: Схема деформированной арматуры в плите

Рис. 11: График перемещений в зависимости от времени для центра армированной плиты

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колчетков К.Е., Котляревский В.А., Забегаев А.В. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий. Книга 1. М.: Изд-во АСВ. 1995. 320 с.
2. Баженов Ю.М. Бетон при динамическом нагружении. – М.:Стройиздат, 1970. 271 с.
3. Физика взрыва / Под ред. Л.П. Орленко. – Изд. 3-е, переработанное. – В 2 т. Т.1.– М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. 832 с.
4. Саламахин Т.М. Физические основы механического действия взрыва и методы определения взрывных нагрузок. М.: ВИА, 1974. 255 с.
5. Кук М.А. Наука о промышленных взрывчатых веществах / М.А. Кук.– М.: Недра, 1980. 455 с.
6. Володин Г.Т., Новиков А.С. Геометрическая нелинейность в задачах разрушения оболочечных конструкций взрывом. Тула: Известия ТулГУ. Технические науки. 2014. Вып. 3. С. 94-103
7. Володин Г.Т., Новиков А.С. Энергетический метод в задачах разрушения элементов конструкций взрывной нагрузкой // Известия ТулГУ. Технические науки. 2017. Вып. 6. С. 243-255
8. Володин Г.Т., Новиков А.С. О проблеме гарантированного разрушения оболочечных конструкций взрывом неконтактных зарядов конденсированных ВВ // Вестник ТулГУ. Сер. Дифференциальные уравнения и прикладные задачи. 2013. Вып. I. С. 40-47
9. Журавлев Г.М., Гвоздев А.Е., Калинин А.Н., Кузовлева О.В., Агеев Е.В., Куриен Н.С. Разрушение пластины взрывной нагрузкой. Журнал «Известия Юго-Западн. государственного университета». Курск, Том 7, № 3(24). 2017. С 24-42
10. Makarov E.S., Cheglov A.E., Gvozdev A.E., Zhuravlev G.M., Sergeev N.N., Kazakov M.V., Breki A.D. Power required in the plastic deformation of metallic powder materials. Steelin-Translation, 2018. Vol. 48, № 9, pp. 597-602
11. Куриен Н.С. Свойства и разрушение материалов под воздействием ударной нагрузки. Доклады 6-я Международная научно-практическая конференция молодых ученых и студентов ОПЫТ ПРОШЛОГО – ВЗГЛЯД В БУДУЩЕЕ. ТулГУ, БНТУ, ДНТУ. г. Тула, 2 - 3 ноября 2016 г. С. 387-392.
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. Журавлев Г.М., Куриен Н.С. Математическое моделирование взрывного воздействия в ANSYS/AUTODYN // Сборник материалов XX Международной конференции "Актуальные проблемы строительства, строительной индустрии и архитектуры Тула: Изд-во ТулГУ, 2019, С. 191
14. Журавлев Г.М., Куриен Н.С. Математическое моделирование взрывного воздействия неконтактного заряда на изотропную бетонную плиту // Сборник материалов XX Международной конференции "Актуальные проблемы строительства, строительной индустрии и архитектуры Тула: Изд-во ТулГУ, 2019, С.194

15. Баландин П.П. К вопросу о гипотезах прочности // Вестник инженеров и техников. 1937. №1. С.12-36.
16. Новацкий В. Теория упругости. М.: Мир. 1975. 872 с.
17. Новацкий В. Динамические задачи термоупругости. М.: Мир. 1970. 436 с.
18. Бате К.Ю. Методы конечных элементов / К.Ю. Бате. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 1024 с.
19. Бате К. Численные методы анализа и метод конечных элементов / К. Бате, Е. Вилсон. М.: Стройиздат, 1982. 448 с.
20. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. М.: Мир, 1975. 543 с.
21. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы / Р. Галлагер. М.: Мир, 1984. 428 с.
22. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд. М.: Мир, 1979. 392 с.
23. 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.
24. Tham C.Y.(2005) Reinforced concrete perforation and penetration simulation using Autodyn 3D. Finite Elements in Analysis and Design, vol. 41, pp. 1401-1410.
25. Riedel W.(2000) Betonun terdynamis chenlasten, Meso- und makrome chanisc hemodelle und ihre parameter. Ph. D thesis, EMI-Bericht, 220 p.
26. 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.

REFERENCES

1. Kochetkov, K. E., Kotlyarevsky, V. A., Zabegaev, A. V., 1995, "Accidents and catastrophes. Prevention and elimination of consequences" [Avarii i katastrofy. Preduprezhdenie i likvidaciya posledstvij], Moscow, Izd-vo ACV, 320 p.
2. Bazhenov, Yu. M., 1970, "Concrete under dynamic loading" [Beton pri dinamicheskom nagruzhении], Moscow, Izd-vo Strojizdat, 271 p.
3. Orlenko, L. P., 2002, "Physics of explosion" [Fizika vzryva], Moscow, FIZMATLIT, vol. 1, 832 p.
4. Salamakhin, T. M., 1974, "The physical basis of the mechanical actions of explosion and methods of calculation of explosive loads" [Fizicheskie osnovy mekhanicheskogo dejstviya vzryva i metody opredeleniya vzryvnyh nagruzok], Moscow, Izd-vo VIA, 255 p.
5. Cook, M. A., 1980, "The science of industrial explosives" [Nauka o promyshlennyh vzryvchatyh veshchestvah], Moscow, Izd-vo Nedra, 455 p.
6. Volodin, G. T., Novikov, A. C., 2014, "Geometric nonlinearity in problems of destruction of shell structures by explosion" [Geometricheskaya nelinejnost' v zadachah razrusheniya obolochechnyh konstrukcij vzryvom], Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki, No. 3, pp. 94-103.

7. Volodin, G. T., Novikov, A. C., 2017, "Energy method in problems of structural elements destruction by explosive load" [Energeticheskij metod v zadachah razrusheniya elementov konstrukcij vzryvnoj nagruzkoj], *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki*, No. 6, pp. 243-255.
8. Volodin, G. T., Novikov, A. C., 2013, "On the problem of guaranteed destruction of shell structures by explosion of non-contact charges of condensed" [O probleme garantirovannogo razrusheniya obolochecnykh konstrukcij vzryvom nekontaktnykh zaryadov kondensirovannykh VV], *Vestnik TulGU. Ser. Differencialnye uravneniya i prikladnye zadachi*, vol. 1, pp. 40-47.
9. Zhuravlev, G. M., Gvozdev, A. E., Kalinin, A. N., Kuzovleva, O. V., Ageev, E. V., Kuryan, N. S., 2017, "Plate Destruction by explosive load" [Razrushenie plastiny vzryvnoj nagruzkoj], *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta*, vol. 7, No. 3 (24), pp. 24-42.
10. Makarov, E. S., Cheglov, A. E., Gvozdev, A. E., Zhuravlev, G. M., Sergeev, N. N., Kazakov, M. V., Breki, A. D., 2018, "Power required in the plastic deformation of metallic powder materials", *Steel in Translation*, vol. 48, No. 9, pp. 597-602.
11. Kurien, N. S., 2016, "Properties and destruction of materials under impact load" [Svoystva i razrushenie materialov pod vozejstviem udarnoj nagruzki], 6th international scientific and practical conference of young scientists and students EXPERIENCE of the PAST-a LOOK into the FUTURE, Tula, pp. 387-392.
12. Zhuravlev, G. M., Kurin, N. S., 2017, "Statement of the problem of mathematical modeling of explosion resistance and guaranteed destruction of plates by explosive load" [Postanovka zadachi matematicheskogo modelirovaniya vzryvostojkosti i garantirovannogo razrusheniya plastin vzryvnoj nagruzkoj], *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii*, Orel, *Izd-vo OGU im. I. S. Turgeneva*, No. 2, pp. 56-63.
13. Zhuravlev, G. M., Kurin, N. S., 2019, "Mathematical modeling of explosive impact in ANSYS/AUTODYN" [Matematicheskoe modelirovanie vzryvnogo vozejstviya v ANSYS/AUTODYN], proceedings of the XX International conference "Actual problems of construction, construction industry and architecture", Tula, *Izd-vo TulGU*, p. 191.
14. Zhuravlev, G. M., Kurin, N. S., 2019, "Mathematical modeling of the explosive effect of a non-contact charge on an isotropic concrete slab" [Matematicheskoe modelirovanie vzryvnogo vozejstviya nekontaktnogo zaryada na izotropnuyu betonnuyu plitu], proceedings of the XX International conference "Actual problems of construction, construction industry and architecture", Tula, *Izd-vo TulGU*, p. 194.
15. Balandin, P. P., 1937, "On the hypothesis of strength" [K voprosu o gipotezah prochnosti], *Bulletin of engineers and technicians*, No. 1, pp. 12-36.
16. Novatsky, V., 1975, "Theory of elasticity" [Teoriya uprugosti], Moscow, *Izd-vo Mir*, 872 p.
17. Nowacki, V., 1970, "Dynamic problems of thermoelasticity" [Dinamicheskie zadachi termo-uprugosti], Moscow, *Izd-vo Mir*, 436 p.
18. Bathe, K. Y., 2010, "Finite element Methods" [Metody konechnykh elementov], Moscow, *Izd-vo FIZMATLIT*, 1024 p.
19. Bathe, K.Y., 1982, "Numerical methods of analysis and finite element method" [Chislennyye metody analiza i metod konechnykh elementov], Moscow, *Izd-vo Strojizdat*, 448p.
20. Zenkevich, O., 1975, "Finite element Method in engineering" [Metod konechnykh elementov v tekhnike], Moscow, *Izd-vo Mir*, 543 p.

21. Gallagher, R., 1984, "Finite element Method. Basics" [Metod konechnyh elementov. Osnovy], Moscow, Izd-vo Mir, 428 p.
22. Segerlind, L., 1979, "Application of the finite element method" [Primenenie metoda konechnyh elementov], Moscow, Izd-vo Mir, 392 p.
23. 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.
24. Tham, C. Y., 2005, "Reinforced concrete perforation and penetration simulation using Autodyn 3D". Finite Elements in Analysis and Design, vol. 41, pp. 1401-1410.
25. Riedel, W., 2000, "Betonun terdynamis chenlasten, Meso- und makrome chanisc hemodelle und ihre parameter", Freiburg, Breisgau, EMI-Bericht, 220 p.
26. 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.

Получено 17.10.2019 г.

Принято в печать 20.12.2019 г.