

РАЗРУШЕНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ПЛИТЫ ВЗРЫВНОЙ НАГРУЗКОЙ

Журавлев Г.М., Теличко В.Г., Куриен Н.С.

Тульский государственный университет

Рассмотрено решение задачи об определении напряженно-деформированного состояния простейших элементов строительных конструкций, плит, под действием взрывной нагрузки. Решена модельная задача для заряда взрывчатого вещества сферической формы, расположенного над центром плиты. Все расчеты производились в среде ANSYS LS-DYNA, получены результаты в форме графиков перемещений от времени. Проведено сравнение с решением Г.Т. Володина.

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

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. Лучшим образом согласуются с экспериментальными данными те из них, в основе которых лежит энергетический метод расчета [1]. 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 заряда взрывчатых вещества (ВВ) в окружающем пространстве [2].

В связи с этим нахождение условий разрушения элементов строительных конструкций взрывом неконтактных зарядов, а также совершенствование методов расчета в контексте применения современных программных комплексов основанных на ме-

тоде конечных элементов (КЭ) представляет собой актуальную задачу, особенно в прикладном плане.

Рассмотрим действие нагрузки, создаваемой взрывом неконтактного заряда конденсированного взрывчатого вещества в воздухе на изотропную бетонную плиту. Нагрузка от взрыва 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.

Заряд взрывчатого вещества сферической формы расположен над центром плиты, в ближайшей области действия взрыва, поэтому давлением окружающей среды можно пренебречь.

Распределение удельного импульса по поверхности плиты определяется функцией [3]

$$I = I_{(i_n i_t)} \quad (1)$$

где i_n – нормальная составляющая,

i_t – тангенциальная составляющая удельного импульса.

Тангенциальной составляющей удельного импульса можно пренебречь, в предположении, что поверхность плиты является в достаточной степени гладкой. Расчет удельного импульса 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 разделение 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 взрыва заряда взрывчатого вещества, находящегося в ближней 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 [2].

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

Т.М. Саламахин показал [2], что нормальная составляющая удельного импульса взрывной нагрузки, действующая на элемент преграды, может быть вычислена, с учетом отражения продуктов взрыва и деформирования поверхности преграды, по формуле:

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

где $P(t)$ – давление продуктов взрыва на плиту,

t – время, отсчитываемое от момента столкновения первой частицы потока продуктов взрыва с плитой в точке с координатами (x, y) .

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 (см. рис. 1).

Кинетическая энергия $d\mathcal{E}$, полученная элементом плиты, согласно импульсному характеру действующей нагрузки, вычисляется по формуле [1]:

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

где ρ – плотность материала плиты,

– обобщенная характеристика заряда (литой тротил = 400 м/с),

C – масса заряда.

Кинетическая энергия, полученная плитой, за время действия взрывной нагрузки определяется по формуле, полученной Г.Т. Володиным [1]:

$$\Theta = \frac{A_0^2 C^2 z_*^4}{2\rho h} \int_{-a-b}^a \int_{-a-b}^b \frac{dxdy}{\left[z_*^2 + (x-x_*)^2 + (y-y_*)^2 \right]^4}. \quad (5)$$

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:

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

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.

$$\sigma_x = -\frac{Ez}{1-\mu^2} \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right);$$

$$\sigma_y = -\frac{Ez}{1-\mu^2} \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \right);$$

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

$$K_{v,b} = 1,58 - 0,35 \log_{10} t + 0,07 (\log_{10} t)^2. \quad (8)$$

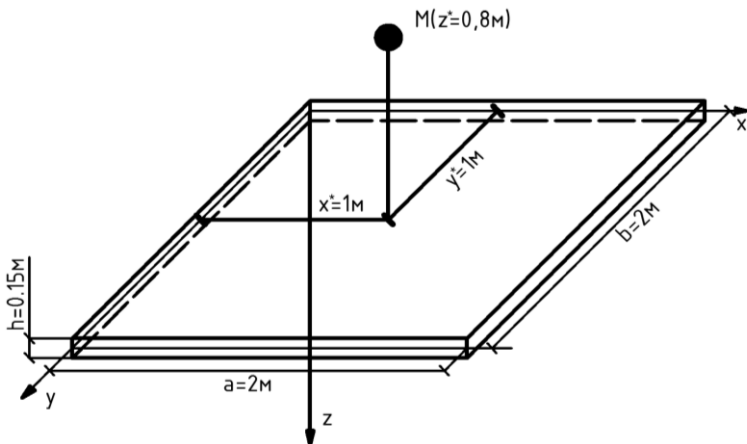


Рис. 1 – Расчётная схема

Критерий прочности примем в виде [4]:

На основе изложенного выше подхода Г.Т. Володина и Т.М. Саламахина [1,2] была решена задача деформирования плиты под действием сферического заряда (рис. 1). 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. Вычисления 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.

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 [1] на предмет проверки адекватности работы программы.

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 [5].

На рис. 2 показан график перемещения точки в центре плиты (мм) во времени (с).

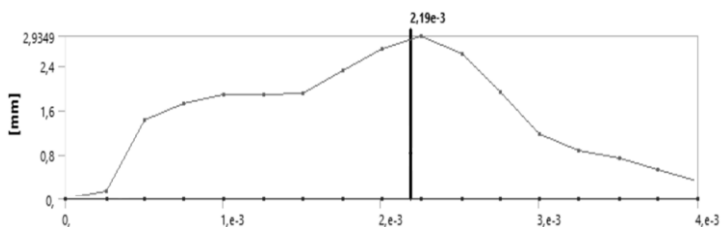


Рис. 2 – График перемещений в зависимости от времени для центра плиты

В результате имеем: 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 $w = 2,94$ мм.

В результате компьютерного моделирования установлено:

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.

Основные научные и практические результаты заключаются в следующем:

1. На основе численного моделирования в трехмерной упругопластической постановке произведена оценка результатов воздействия сферического заряда ВВ на плиту с армированием сеткой и без.

2. Определено, что для повышения уровня автоматизации проводимых расчетов, а так улучшения эффективности работы инженеров-строителей при проектировании сооружений с уче-

том взрывостойкости можно использовать поставляемое совместно с ANSYS программное обеспечение LS -DYNA, что обеспечит надежные и достоверные результаты, как было показано в данной статье.

3. Также надо отметить, что 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 зарядов ВВ.

Библиографический список

1. Володин, Г.Т. Энергетический метод в задачах разрушения элементов конструкций взрывной нагрузкой / Г.Т. Володин, А.С. Новиков // Известия ТулГУ. Технические науки. 2017. - Вып. 6. – С. 243-255.

2. Саламахин, Т.М. Физические основы механического действия взрыва и методы определения взрывных нагрузок / Т.М. Саламахин. – М.: ВИА, 1974. – 255 с.

3. Кук, М.А. Наука о промышленных взрывчатых веществах / М.А. Кук. – М.: Недра, 1980. – 455 с.

4. Баландин, П.П. К вопросу о гипотезах прочности / П.П. Баландин // Вестник инженеров и техников. –1937. – №1. – С. 12-36.

5. Penetration of reinforced concrete by BETA-B-500. Numerical analysis using a new macroscopic concrete model for hydrocodes / W. Riedel, K. Thoma, S. Hiermaier, S. Schmolinske // Proceeding of 9th international symposium on interaction of the effects of munitions with structures. – Berlin, PP. 315-322.

УДК 691.33

БИОКОРРОЗИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ЗДАНИЯХ И СООРУЖЕНИЯХ

Карпушин С.Н., Родин А.И., Красноглазов А.М.

Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва

Приводятся сведения о биокоррозии строительных материалов в различных зданиях и сооружениях. Рассмотрены способы защиты бетонов от негативного воздействия микроскопических организмов.