

# ПАКЕТ ПРОГРАММ ЛОГОС. РЕАЛИЗАЦИЯ ПОДХОДОВ И АЛГОРИТМОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ БЕТОННЫХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

*И. В. Серякова, А. М. Гельберг, Д. Ю. Дьянов*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

В настоящее время во ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» ведется разработка отечественного многофункционального пользовательского пакета программ инженерного анализа и суперкомпьютерного моделирования для высокотехнологичных отраслей промышленности (далее – пакет программ (ПП) «ЛОГОС») [1–2]. Одной из составных частей ПП «ЛОГОС» является программный модуль для моделирования прочности (далее – ЛОГОС-ПА).

Одним из условий успешного внедрения ПП «ЛОГОС» в полный цикл разработки изделий на предприятиях высокотехнологичных отраслей промышленности является наличие в ЛОГОС-ПА функциональных возможностей для моделирования железобетонных конструкций при решении динамических задач прочности.

В данном докладе представлено описание набора методов и алгоритмов для моделирования железобетонных конструкций при решении динамических задач прочности. Необходимость реализации модели железобетона в ПП ЛОГОС-ПА была обусловлена потребностью учитывать различные воздействия на железобетонные конструкции при решении динамических задач прочности, в частности – воздействия снарядов на железобетонные преграды, падение тяжелого пассажирского самолёта на контеймент АЭС, и т. д.

Для демонстрации работоспособности реализованных функциональных возможностей для моделирования железобетонных конструкций в докладе представлены результаты численного расчета тестовых задач, проведенного с использованием ПП ЛОГОС-ПА.

## Описание модели бетона Джонсона – Холмквиста

Одной из моделей, используемых в промышленности при решении задач является модель бетона Джонсона – Холмквиста [3–4]. Её можно применять к бетону, испытывающему большие деформации со значительной скоростью и высокое давление.

Данная модель использовалась при моделировании железобетона, поэтому приведем краткое описание данной модели.

Давление  $p$  в материале задаётся кусочно-непрерывной функцией от объёмной деформации

$$\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1:$$

$$P(\mu) = \begin{cases} \frac{P_{crush}}{\mu_{crush}} \cdot \mu, & \mu \leq \mu_{crush} \\ \frac{P_{lock} - P_{crush}}{\mu_{lock}^* - \mu_{crush}} \cdot (\mu - \mu_{crush}) + P_{crush}, & \mu_{crush} < \mu < \mu_{lock}^* \\ K_1 \cdot \bar{\mu} + K_2 \cdot \bar{\mu}^2 + K_3 \cdot \bar{\mu}^3, & \mu \geq \mu_{lock}^* \end{cases} \quad (1)$$

где  $\bar{\mu} = \frac{\mu - \mu_{lock}}{1 + \mu_{lock}}$ , а  $\mu_{lock}^*$  находится как решение

третьего уравнения для  $p(\mu) = P_{lock}$ :

$$\begin{aligned} \frac{\mu_{lock}^* - \mu_{lock}}{1 + \mu_{lock}} \cdot K_1 + \left( \frac{\mu_{lock}^* - \mu_{lock}}{1 + \mu_{lock}} \right)^2 \cdot K_2 + \\ + \left( \frac{\mu_{lock}^* - \mu_{lock}}{1 + \mu_{lock}} \right)^3 \cdot K_3 - P_{lock} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

В случае растяжения давление считается по формуле

$$P(\mu) = \frac{P_{crush}}{\mu_{crush}} \cdot \mu, \quad (3)$$

однако оно не может опускаться ниже значения  $T(1-D)$ , где  $D$  – мера поврежденности материала.

$K_1, K_2, K_3, \mu_{crush}, P_{crush}, \mu_{lock}, p_{lock}, T$  – задаваемые пользователем параметры материала.

Величина объёмного модуля бетона Джонсона – Холмквиста зависит от того, в какой зоне давления он находится – упругой, так называемой зоне компактации пор или в зоне абсолютно плотного материала

$$K(\mu) = \begin{cases} K_0, & K_0 = \frac{P_{crush}}{\mu_{crush}}, \quad \mu \leq \mu_{crush} \\ K_a, & K_a = (1 - D_c) \cdot K + D_c \cdot K_1, \quad \mu_{crush} < \mu < \mu_{lock}^* \\ K_1, & \mu \geq \mu_{lock}^* \end{cases} \quad (4)$$

где  $D_c = \frac{\mu^P}{\mu_{lock}}$ .

Предел текучести зависит от скорости деформации  $\dot{\epsilon}$  и меры поврежденности

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon^P + \Delta \mu^P}{\epsilon_f}, \quad (5)$$

принимающей значения от 0 до 1, где  $\Delta \mu^P$  – приращение объемной пластической деформации, соответствующее раздавливанию и схлопыванию на каждом шаге по времени после превышения объемной деформацией  $\mu$  значения  $\mu_{crush}$ ,  $\Delta \epsilon^P$  – сдвиговая пластическая деформация,  $D_1$  и  $D_2$  – константы материала, а  $T^* = \frac{T}{FC}$  – нормализованное максимальное гидростатическое давление.

Объемная пластическая деформация находится как разность между объемной деформацией  $\mu$  и упругой объемной деформацией  $\mu^e$ :

$$\mu^P = \mu - \mu^e. \quad (6)$$

Объемная деформация находится с помощью давления и объемного модуля:

$$\mu^e = \frac{P}{K} \quad (7)$$

Нормализованное эквивалентное напряжение (интенсивность напряжений, отнесенная к квазистатической прочности на одноосное сжатие) задается формулой

$$\sigma^* = \frac{\sigma}{FC'}, \quad (8)$$

где  $\sigma$  – фактическое эквивалентное напряжение, а  $FC$  – прочность при квазистатическом одноосном сжатии.

Поверхность прочности после разрушения рассчитывается редуцированием значения когезионных сил (сил сцепления) начальной поверхности разрушения. Таким образом, при трещинообразовании предел текучести снижается и для полностью разрушенного сжатием материала имеет вид

$$\sigma^* = BP^{*N} \left[ 1 + Cln \dot{\epsilon}^* \right]. \quad (9)$$

Железобетон традиционно рассматривается как композиционный материал, состоящий из двух совместно работающих моделей материалов: бетона и стали. В конечно-элементных расчетах можно выделить следующие технологии моделирования арматуры в железобетоне [5]:

а) дискретная – узлы балочных элементов для арматуры совпадают с узлами объемной конечно-элементной сетки для бетона;

б) встроенная – узлы сеток арматуры и бетона не совпадают, но связаны уравнениями совместности;

в) распределенная – предполагается, что арматура равномерно распределена по элементам конечно-элементной сетки для бетона.

### Моделирование железобетона методом встроенной арматуры

Арматурные стержни и бетон моделируются с помощью балочных элементов и элементов сплошной среды, соответственно. Сетка для арматуры из балочных элементов находится внутри сетки элемента сплошной среды. Каждая из них имеет свое собственное независимое движение. Метод кинематических ограничений – способ, по которому соединяются эти две сетки [6].

В связывании с ограничениями подразумевается две области – главная (элементы сплошной среды) и подчиненная (балочные элементы).

Обычно и скорость, и ускорение должны быть ограничены. Ограничение первого обеспечивает сохранение импульса, второго – баланс сил. Алгоритм является одинаковым и для скорости и для ускорения, поэтому приведем дальнейшее обсуждение только для скорости.

На начальном этапе имеем несогласованное поле скоростей. Узлы балки являются подчиненными и обозначаются с помощью строчных (маленьких) букв; узлы твердого элемента являются главными и обозначаются с помощью прописных (заглавных) букв.

Первый шаг метода кинематических ограничений заключается в том, что узлы подчиненной области распределяют свою узловую массу и импульс в узлы главной области.

Второй шаг состоит в обновлении узловых скоростей главного элемента с помощью деления нового импульса на новую массу.

Далее осталось ограничить скорость в подчиненных узлах, с помощью интерполирования скорости из узлов главной области.

Таким образом, имеем подчиненные узлы, которые движутся точно так же, как и главные. Схема процесса показана на рис. 1.

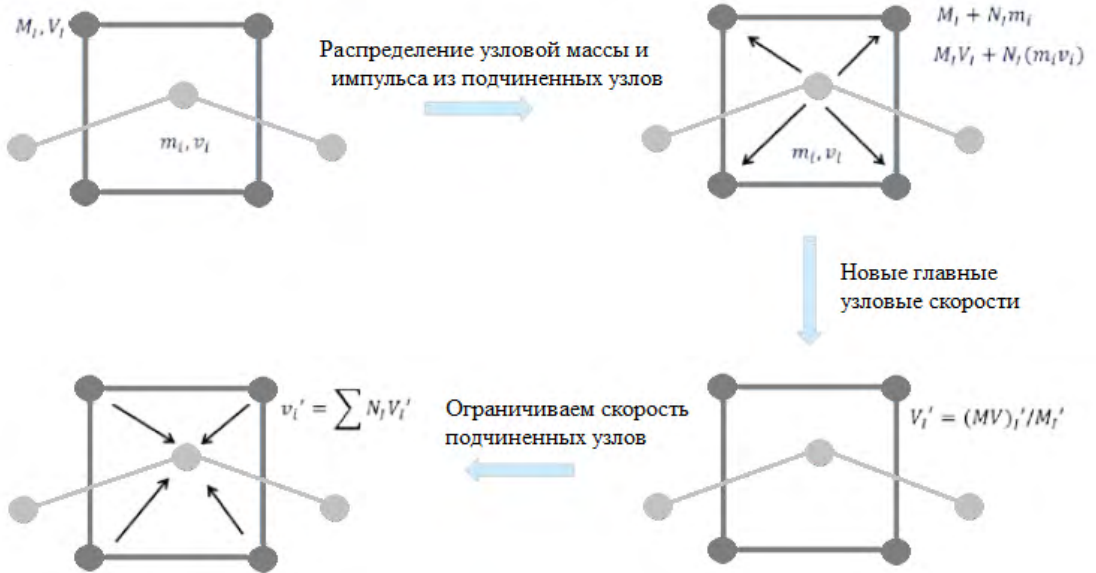


Рис. 1. Метод кинематических ограничений

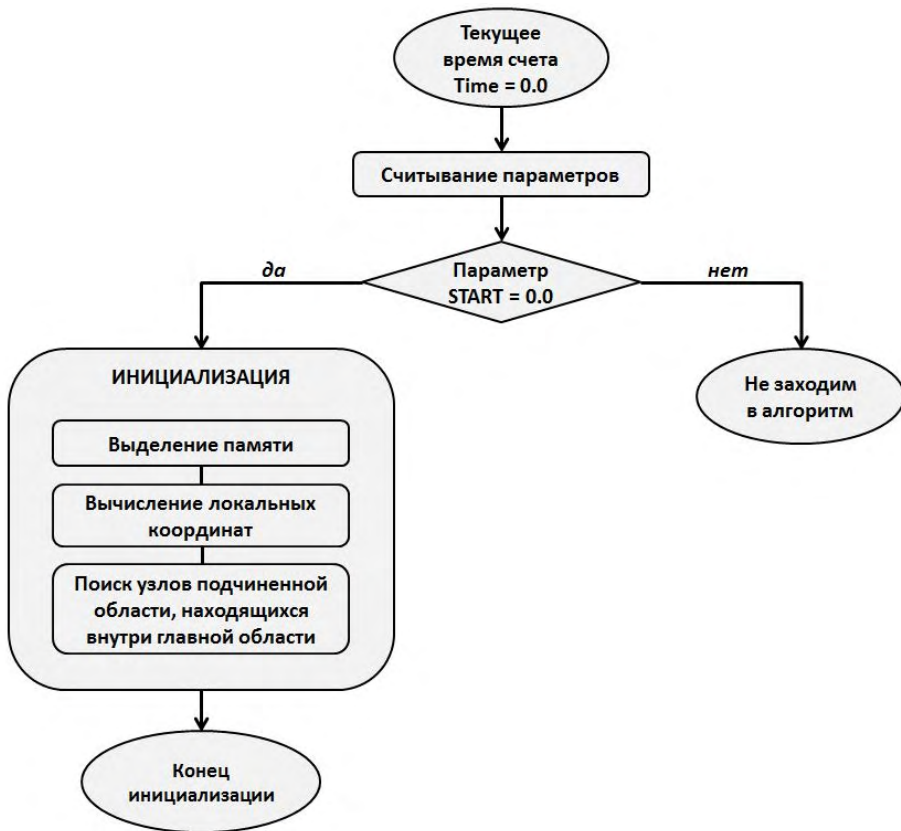


Рис. 1. Блок-схема алгоритма на начальный момент времени

В качестве иллюстрации работы программы далее приведены блок-схемы организации расчетного алгоритма для моделирования метода кинематических ограничений. На рис. 2 блок-схема демонстрирует последовательность действий на

начальный момент времени. На рис. 3 приведен алгоритм действий, работающий уже в процессе счета на каждом шаге по времени.

## Особенности реализации

В реальных задачах узлы балки не всегда располагаются так хорошо, что все элементы сплошной среды содержат в себе хотя бы один узел балочного элемента. Если балка пересекает какой-нибудь элемент сплошной среды и в него не попали узлы балки, то этот элемент не получит никакого распределения от балки, и алгоритм не выполнится.

Таким образом, необходимо ставить дополнительные «точки соединения» между двумя конечными узлами балки. Схема расположения таких узлов представлена на рис. 4.

Каждый узел балки имеет свою узловую массу и узловую скорость. Эти два факта являются «физическими». Но для искусственно созданных «точек соединения», таких свойств нет. Для скорости это решается довольно просто. Предполагается, что скорость в «точке соединения» должна быть интерполирована из конечных точек балки.

Чтобы решить проблему с массой, воспользуемся приемом, который называется «мостовое соединение». Балка делится на подчиненную и главную. Подчиненная балка строится в промежутке между связью узлов главной балки и элемента сплошной среды. Теперь получается два соединения. Первое соединение между подчиненными и главными узлами балочного элемента; второе – между подчиненными узлами балочного элемента и сеткой элемента сплошной среды. Подчиненная балка служит «мостом», соединяющим реальную балку и элементы сплошной среды. Данная концепция показана на рис. 5.

Масса в точках соединения принимает значение узловой массы подчиненной балки. Это обеспечивает физический смысл и теоретически правильно. Точка соединения имеет свою скорость, ограниченную с помощью узлов элемента сплошной среды в соответствии с методом кинематических ограничений, описанным выше.

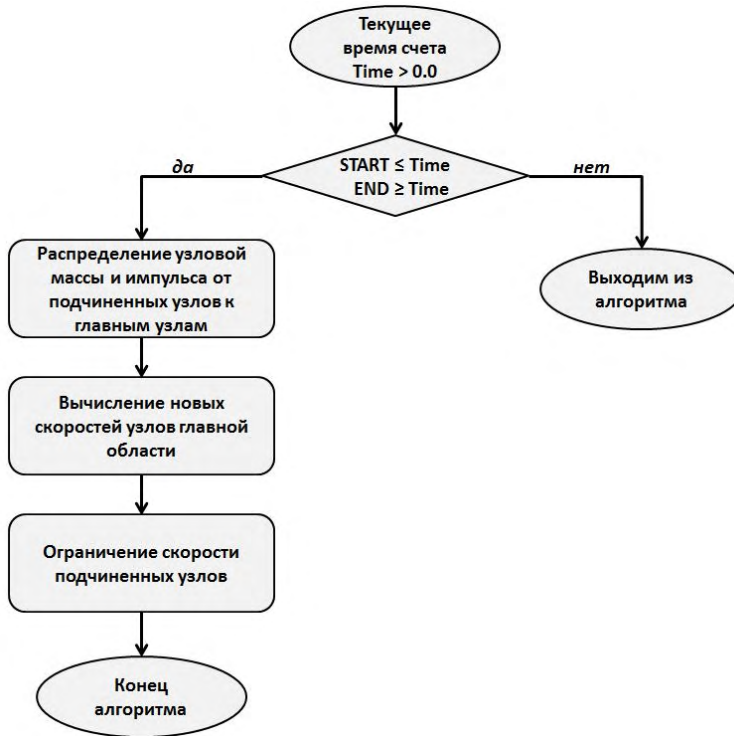


Рис. 3. Блок-схема алгоритма на каждом шаге по времени

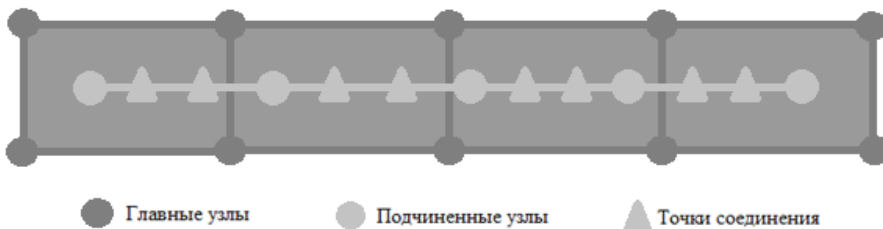


Рис. 2. Схема распределения точек соединения

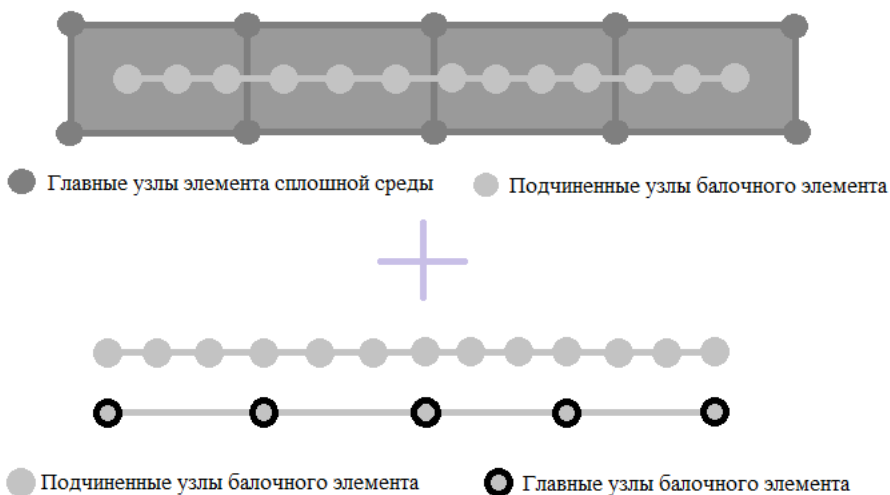


Рис. 5. Схема «мостового соединения»

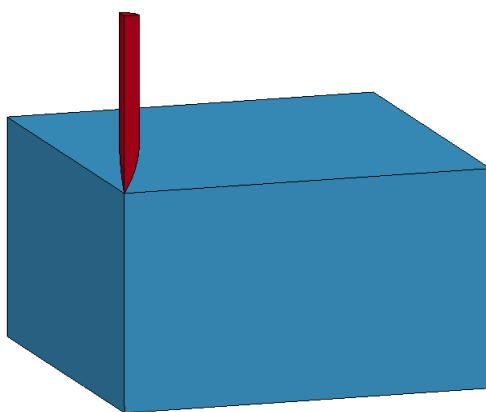


Рис. 6. Начальная геометрия бетонной преграды и стального ударника

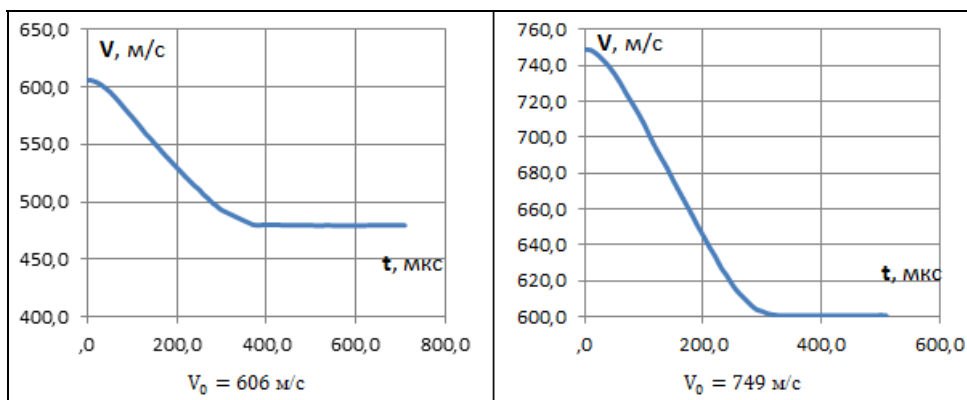


Рис. 3. График зависимости скорости ударника от времени

### Тестовые расчеты

#### Пробитие бетонной преграды стальным ударником

Начальная геометрия представлена на рис. 6.

Для ударника использовалась модель кусочно-линейного упругопластического материала со сле-

дующими параметрами: плотность  $\rho = 8020 \text{ кг/м}^3$ , модуль Юнга  $Y_0 = 1.72 \text{ ГПа}$ , коэффициент Пуассона 0.3, пластическая деформация разрушения 1,5.

На рис. 7 представлены результаты расчёта при начальных скоростях ударника  $V_0 = 606 \text{ м/с}$  и  $V_0 = 749 \text{ м/с}$ .

На рис. 8 представлены пластические деформации на момент вылета ударника из бетонной преграды, полученные с помощью ПП ЛОГОС-ПА.

Сравнение полученных скоростей с экспериментальными данными [7] представлено в таблице.

Результаты расчетов

	Экспериментальные значения, м/с	Результаты ЛОГОС-ПА, м/с	Погрешность, %
$V_0 = 606$ м/с	449	479	6,7
$V_0 = 749$ м/с	615	601	2,3

Пробитие железобетонной преграды стальным ударником

Конечно-элементная модель представлена на рис. 9. Арматурные стержни моделируются балочными элементами с упругопластическим материа-

лом, для бетона используется модель Джонсона – Холмквиста. Скорость ударника 400 м/с.

На рис. 10 представлены пластические деформации на конечный момент времени ударника из железобетонной преграды, полученные с помощью программного модуля ЛОГОС-ПА.

**Заключение**

В работе представлено описание подходов и алгоритмов для моделирования железобетонных конструкций при решении динамических задач прочности. В частности, подробно описан метод встроенной арматуры. Преимуществом данного метода является применение ограничений между двумя наборами узлов, один набор для балочных элементов и один набор для элементов сплошной среды. Таким образом, не появляется проблем с сеткой как в дискретных моделях железобетона, где присутствуют общие узлы, а также не нужно создавать неоднородные модели материала (композиты) как в распределенных моделях.

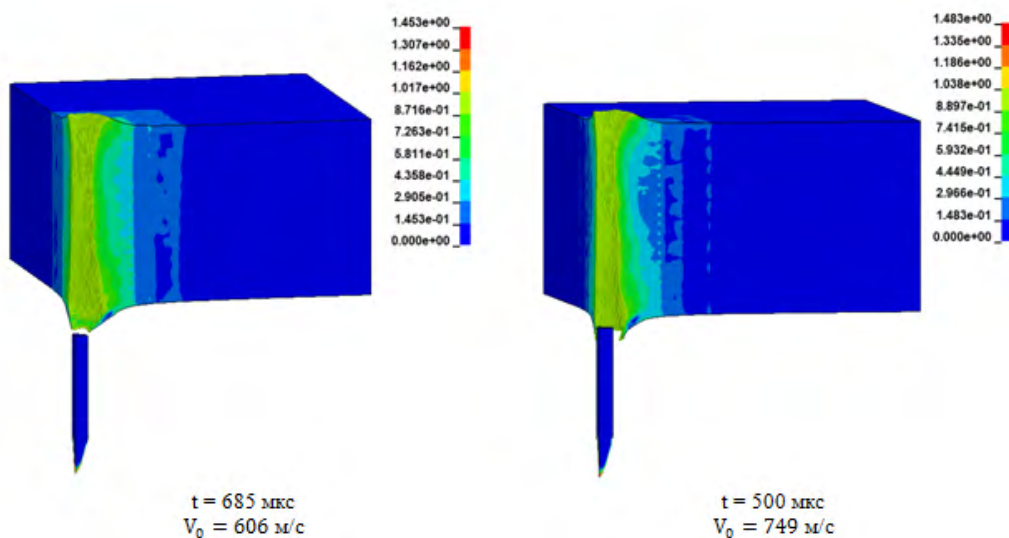


Рис. 8. Пластические деформации на момент вылета ударника из плиты

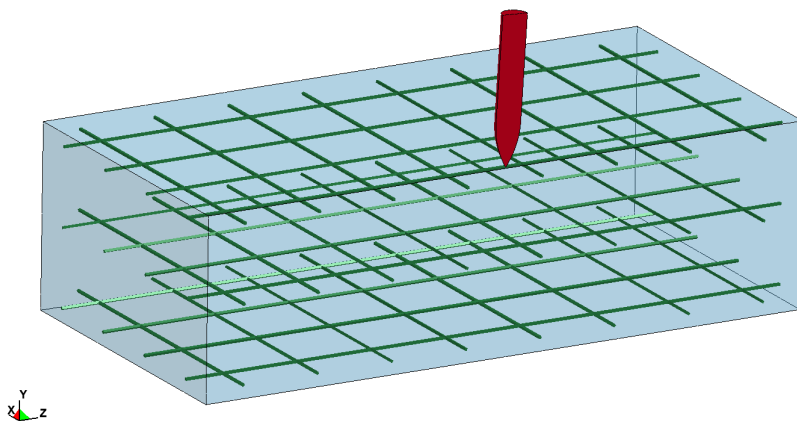


Рис. 4. Конечно-элементная модель

Time = 0.00225

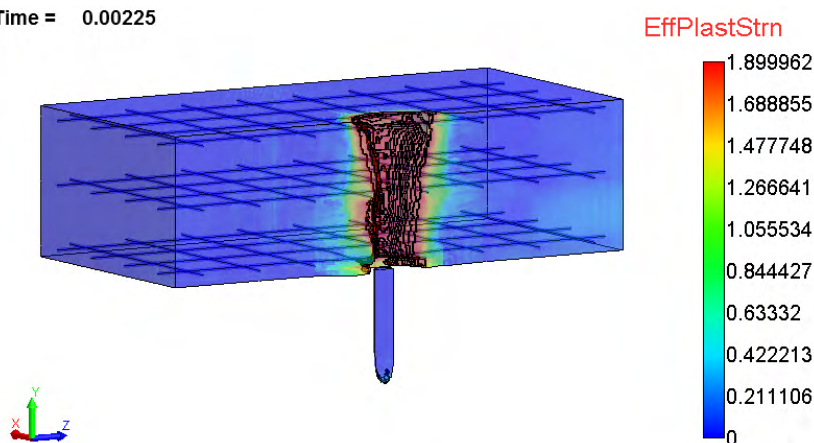


Рис. 5. Пластические деформации на конечный момент времени

Приведена программная реализация метода встроенной арматуры для моделирования железобетонных конструкций при решении динамических задач прочности в программном модуле для моделирования задач прочности пакета программ «ЛОГОС».

Также в работе представлены тестовые расчеты, демонстрирующие работоспособность представленных алгоритмов.

### Литература

1. Цибереv К. В., Авдеев П. А., Артамонов М. В., Борляев В. В., Величко С. В., Волков А. Ю., Володина Н. А., Дьянов Д. Ю., Корсакова Е. И., Косарим С. С., Кулыгина О. Н., Мышкина И. Ю., Наумов А. О., Присташ М. М., Резвова Т. В., Резяпов А. А., Родионов А. В., Симонов Г. П., Спиридонов В. Ф., Стародубов С. В., Тарадай И. Ю., Филимонкин Е. А., Челаков А. А., Шувалова Е. В., Рябов А. А., Романов В. И., Куканов С. С., Речкин В. Н., Вяткин Ю. А., Корнев А. В., Ермакова Ю. В., Митрофанов О. В., Чупин П. В., Иевлев Д. Г., Душко А. Н., Крундаева А. Н., Новоселов А. В., Габов Д. Пакет программ ЛОГОС. Функциональные возможности для решения задач прочности // Труды XIII международного семинара «Супервычисления и математическое моделирование» - Саров, 2011.

2. Дьянов Д. Ю., Спиридонов В. Ф., Цибереv К. В., Наумова Е. И., Борляев В. В., Стародубов С. В., Шувалова Е. В., Медведкина М. В., Артемова Е. О., Челаков А. А., Казанцев А. В., Рябов А. А., Романов В. И., Куканов С. С. Пакет программ ЛОГОС. Модуль решения динамических задач прочности // Журнал ВАНТ, сер. Математическое моделирование физических процессов, 2018. Вып. 1, стр. 3–13.

3. Holmquist T. J., Johnson G. R., Cook W. H. A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates, and high pressures I Proc. 14th Int. Symp. Ballistics. Quebec City, Canada, 26–29 September, 1993. Vol. 2. P. 591–600.

4. Meyer C. S. Development of Geomaterial Parameters for Numerical Simulations Using the Holmquist-Johnson-Cook Constitutive Model For Concrete // Weapons and Materials Research Directorate, June 2011.

5. Лукин А. В., Модестов В. С. Конечно-элементное моделирование и анализ напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций // Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. – 2014.

6. Hao Chen, An introduction to «\*Constrained\_beam\_in\_solid» // FEA Information Engineering Journal, February 2017.

7. Hanchak S. L., Forrestal M. J., Young E. R., Ehrgott J. Q. Perforation of concrete slabs with 48 MPa and 140 MPa unconfined compressive strengths // Int. J. Impact Engng. 1992. Vol. 12. No. 1. P. 1–7.