

ПАКЕТ ПРОГРАММ ЛОГОС. РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛЕЙ ПОДУШКИ БЕЗОПАСНОСТИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ ПАССИВНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ АВТОМОБИЛЕЙ

И. В. Серякова, Д. Ю. Дьянов, К. В. Циберев

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

Введение

В настоящее время во ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» разрабатывается пакет программ инженерного анализа ЛОГОС [1] для решения широкого круга задач. По функциональному наполнению и уровню адаптации к современным суперЭВМ, комплекс программ ЛОГОС является уникальным продуктом, не имеющим отечественных аналогов. Одним из основных компонентов пакета программ ЛОГОС является модуль решения динамических задач прочности [2], построенный на основе пакета программ ЛЭГАК-ДК [3-5]. Данный модуль ориентирован на моделирование быстропротекающих процессов деформирования и разрушения конструкций с учетом различных нелинейностей. Примером задач, решаемых с использованием модуля динамической прочности, может служить моделирование крэш-тестов, пробития различных преград, взрывных воздействий на различные конструкции, и т. д. Одним из направлений работ, на которые ориентирован данный пакет программ, является автомобильная промышленность. В современном мире подушки безопасности широко используются для смягчения удара в случае автомобильного столкновения, поэтому для моделирования крэш-тестов требуется использование элементов пассивной системы безопасности автомобиля.

Данный доклад посвящен проблеме моделирования подушек безопасности в пакете программ ЛОГОС. В работе приводятся описание и алгоритмы моделей, используемых в модуле ЛОГОС-Прочность.

Для демонстрации работоспособности реализованных функциональных возможностей по моделированию подушек безопасности в докладе представлены результаты численного расчета тестовых задач, проведенного с использованием пакета программ ЛОГОС. Проводится сравнительный анализ полученных результатов с эталонными решениями.

Описание моделей подушек безопасности

Подушка безопасности представляет собой материал, сложенный определенным образом. В настоящее время в мире существует несколько математических моделей подушек безопасности [6], представим их кратко:

▪ Простая модель подушки безопасности

Для определения давления в подушке используется уравнение состояния идеального газа. Массовый расход на входе задается с помощью кривой. Утечку, или массовый расход на выходе, можно моделировать двумя способами. Первый способ – задание площади вентиля с соответствующим коэффициентом, второй – задание кривой.

▪ Адиабатическая газовая модель

В данной модели существует возможность задания предварительной нагрузки с помощью кривой нагружения. На этом этапе значение функции нагрузка-время равно нулю, и давление в контрольном объеме считается равным произведению начального давления на коэффициент пересчета давления. Как только появляется первое ненулевое значение функции, этап предварительной нагрузки заканчивается, и до конца анализа используется уравнение состояния идеального газа.

▪ Модель Ванга – Нефске

Для определения давления в подушке безопасности используется уравнение состояния идеального газа. Массовый расход на входе задается с помощью кривой. Утечка газа через вентили и за счет пористости ткани, или массовый расход на выходе, определяется с помощью уравнений Ванга – Нефске.

▪ Модель Ванга – Нефске с впрыскиванием струи

Основой является предыдущая модель, с добавлением дополнительных величин для более точного расчета. Струю можно определить либо заданием координат фокуса струи, конца вектора струи и вторичного фокуса струи, либо заданием трех узлов, расположенных в этих точках. Опция впрыскивания дает расчет реального распределения давления в подушке в момент удара о препятствие и начала разветвления подушки. Повышенное давление действует только на те поверхности, которые находятся в прямой видимости по отношению к мнимому началу струи, входящей в отверстие.

▪ Многоструйная модель Ванга – Нефске

Описание аналогично предыдущей модели, с использованием нескольких струй.

▪ Гибридная модель

Описание аналогично модели Ванга – Нефске, но формулы видоизменяются, так как расчет ведется для смеси газов.

▪ Гибридная модель с впрыскиванием струи

Описание аналогично модели Ванга – Нефске с впрыскиванием струи, но формулы видоизменяются, так как расчет ведется для смеси газов.

▪ Гибридная модель Чемкина

Для каждого типа газа вводятся данные о термодинамических характеристиках.

Из представленных математических моделей подушек безопасности две модели рассмотрены более подробно, а затем реализованы в модуле ЛОГОС-Прочность. Первая – это простая модель подушки безопасности. Для моделирования газа используется уравнение состояния идеального газа:

$$p = (\gamma - 1) \rho e \quad (1)$$

где p – давление газа, ρ – плотность газа, e – удельная внутренняя энергия газа, γ – отношение удельных теплоемкостей:

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v}.$$

Из условия сохранения массы, скорость изменения массы, втекающей в подушку, задается следующим образом:

$$\dot{m} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} \quad (2)$$

где \dot{m}_{in} – массовый расход на входе, \dot{m}_{out} – массовый расход на выходе.

Утечка, или массовый расход на выходе, моделируется заданием площади вентиля A с соответствующим коэффициентом вентиля.

На начальном этапе расчета известны следующие входные данные:

- p_e – давление окружающего воздуха;
- ρ_e – плотность окружающего воздуха;
- c_p – теплоемкость при постоянном давлении;
- c_v – теплоемкость при постоянном объеме;
- T – температура поступающего воздуха;
- μ – коэффициент для вентиля;
- A – площадь вентиля, не зависящая от времени;

▪ \dot{m}_{in} – задающая кривая, определяющая массовый расход на входе.

Данная модель не учитывает пористость ткани подушки безопасности, поэтому была реализована еще одна модель – это модель Ванга – Нефске [7].

Как и в предыдущей модели, давление газа внутри подушки безопасности определяется из уравнения состояния идеального газа:

$$p = (\gamma - 1) \rho e \quad (3)$$

где p – давление газа, ρ – плотность газа, e – удельная внутренняя энергия газа, γ – отношение удельных теплоемкостей:

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v}.$$

При расчете массового расхода на выходе используется отношение давлений в следующем виде:

$$Q = \frac{p_e}{p_2}$$

где p_e – внешнее давление, p_2 – внутреннее давление (в подушке).

Отношение для критического давления определяется по формуле:

$$Q_{crit} = \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}.$$

При расчете используется максимальное значение из величин Q и Q_{crit} .

Уравнения Ванга – Нефске для массового расхода через вентили и при утечке за счет пористости ткани имеют вид:

$$\dot{m}_{23} = c_{23} A_{23} \frac{p_2}{R \sqrt{T_2}} Q^{\frac{1}{\gamma}} \sqrt{2 \left(\frac{\gamma R}{\gamma - 1} \right) \left(1 - Q^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right)} \quad (4)$$

и

$$\dot{m}_{p23} = c_{p23} A_{p23} \frac{p_2}{R \sqrt{T_2}} Q^{\frac{1}{\gamma}} \sqrt{2 \left(\frac{\gamma R}{\gamma - 1} \right) \left(1 - Q^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right)}, \quad (5)$$

где R – газовая постоянная, T_2 – внутренняя температура газа подушки безопасности, c_{23} – коэффициент пропускания для вентиля, A_{23} – площадь отверстия вентиля, c_{p23} – коэффициент пропускания при утечке за счет пористости ткани, A_{p23} – площадь утечки за счет пористости ткани.

Для нахождения температуры T_2 используется уравнение состояния идеального газа относительно полного объема подушки:

$$p_2 V = m_2 R T_2 \Rightarrow T_2 = \frac{p_2 V}{m_2 R}. \quad (6)$$

Подставляя выражение температуры (6) в уравнения Ванга – Нефске (4) и (5), мы находим полный массовый расход газа на выходе:

$$\dot{m}_{out} = \dot{m}_{23} + \dot{m}_{p23} = \mu \sqrt{2 p_2 \rho} \sqrt{\frac{\gamma \left(Q^{\frac{2}{\gamma}} - Q^{\frac{\gamma + 1}{\gamma}} \right)}{\gamma - 1}}, \quad (7)$$

где ρ – плотность газа подушки безопасности, μ – параметр характеристики подушки безопасности.

Параметр μ является константой, которая используется Вангом и Нефске:

$$\mu = \left(c_{23} A_{23} + c_{p23} A_{p23} \right).$$

Уравнения решаются итерационно, сходимость обычно достигается за 2–3 итерации.

На начальном этапе расчета известны следующие входные данные:

- c_p – теплоемкость при постоянном давлении;

- c_v – теплоемкость при постоянном объеме;
- T_{in} – температура поступающего воздуха;
- \dot{m}_{in} – массовый расход на входе;
- c_{23} – коэффициент пропускания для вентиля;
- A_{23} – площадь отверстия вентиля;
- c_{p23} – коэффициент пропускания при утечке

за счет пористости ткани;

- A_{p23} – площадь утечки за счет пористости ткани;
- p_e – давление окружающего воздуха;
- ρ_e – плотность окружающего воздуха;

Вычисление объема

Рассматривались два метода моделирования объема подушки безопасности. Прямой подход подразумевает дискретизацию внутренней части подушки безопасности. Одна из трудностей этого метода вычисления объема состоит в том, что у нас поверхность сетки, а значит, возникает вопрос расстановки внутренних точек. Допустим, что выбирается одна дополнительная внутренняя точка, которую назовем центром подушки. Эта точка может располагаться произвольно, определим ее как среднее арифметическое от координат узлов сетки. На основе центра подушки и 3-узлового элемента сетки строим тетраэдр. При таком подходе полный объем подушки безопасности находится как сумма объемов всех входящих тетраэдров, полученных данным способом.

Несмотря на то, что описанный подход применяется напрямую к наполненной воздухом подушке безопасности, его трудно осуществить во время раскрытия подушки, и он дает некоторую погрешность.

Альтернативный подход для вычисления объема подушки безопасности, который применяется во время этапа надувания подушки, рассматривает ее как контрольный объем. Контрольный объем определяется как объем, ограниченный поверхностью, которая моделируется с помощью оболочки или мембранными элементами.

Вычислив расположение и текущую площадь элементов поверхности, можно определить контрольный объем, то есть объем подушки безопасности. Зависимость площади поверхности и контрольного объема выражается через формулу Гаусса-Остроградского:

$$\iiint \phi \frac{\partial \psi}{\partial x} dx dy dz = -\iiint \psi \frac{\partial \phi}{\partial x} dx dy dz + \oint \phi \psi n_x d\Gamma, \quad (8)$$

где первые два интеграла – это интегралы по замкнутому объему, то есть $dV = dx dy dz$, последний интеграл – это интеграл по поверхности, охватывающей объем, и n_x – направляющий косинус между нормалью поверхности и направлением оси X : подобные формы записываются для других двух направлений. Две произвольные функции ϕ и ψ интегрируются только по объему и поверхности.

Выбрав значения для произвольных функций:

$$\phi = 1,$$

$$\psi = x_x,$$

и, принимая во внимание, что интегральная форма объема может быть записана в виде:

$$V = \iiint dx dy dz,$$

выражаем объем с помощью уравнения (8) через поверхностный интеграл:

$$V = \iiint dx dy dz = \oint x n_x d\Gamma. \quad (9)$$

Поверхностный интеграл в уравнении (9) можно аппроксимировать суммированием по всем элементам, входящим в состав подушки безопасности, то есть

$$\oint x n_x d\Gamma \approx \sum_{i=1}^N \bar{x}_i n_{ix} A_i \quad (10)$$

где для каждого элемента i : \bar{x}_i – среднее x -координат, n_{ix} – направляющий косинус между нормалью элемента и направлением по оси X , A_i – площадь поверхности элемента.

Тестовые расчеты

Задача № 1.

Начальная конфигурация водительской подушки безопасности в форме диска приведена на рис. 1. Геометрия построена по следующему принципу: верхнее и нижнее основания диска (радиуса $r = 36$ см) скреплены по краям так, что узлы на границе совпадают. Таким образом, образуется замкнутая поверхность, называемая оболочкой. Толщина оболочки – 0,5 мм.

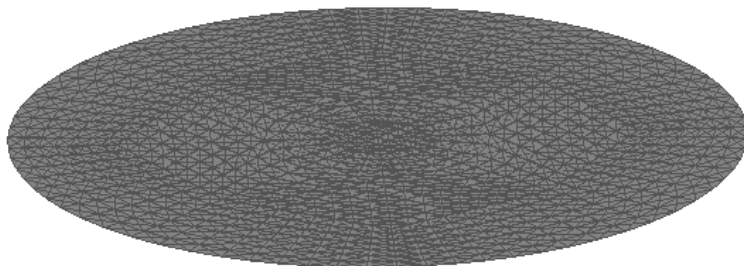


Рис. 1. Начальная конфигурация подушки безопасности

Для моделирования ткани подушки безопасности использован упругий изотропный материал, применяемый для оболочечных и объемных элементов. Плотность материала $\rho = 820 \text{ кг/м}^3$.

Счетная область состоит из 4176 плоских 3-узловых элементов. Сетка также представлена на рис. 1. Время окончания счета задачи $t = 40 \text{ мс}$.

Параметры термодинамических свойств газа подушки безопасности, известные на начальном этапе расчета (входные данные):

- Теплоемкости: $C_v = 774$, $C_p = 1042$.
- Температура поступающего газа: $T_{in} = 800 \text{ К}$.
- Коэффициент пропускания и площадь отверстия вентиля: $c_{23} = 0,7$; $A_{23} = 0,001608 \text{ м}^2$.

- Коэффициент пропускания и площадь утечки из-за пористости ткани: $c_{23} = 0,1$; $A_{23} = 0,005 \text{ м}^2$.

- Плотность и давление окружающего воздуха: $p_e = 100000 \text{ Па}$, $A_{23} = 1 \text{ кг/м}^3$.

На рис. 2–7 приведены графики профилей основных термодинамических свойств газа: объема, давления, плотности, энергии, массового расхода на выходе, температуры. На графиках серой сплошной линией отмечено эталонные решения, а черной точечной линией – решения, полученные с помощью модуля ЛОГОС-Прочность.

Из представленных графиков видно, что результаты, полученные с помощью комплекса программ ЛОГОС-Прочность, хорошо согласуются с эталонным решением.

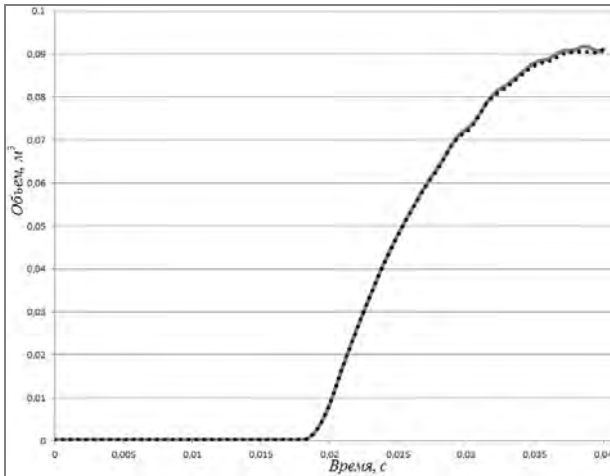


Рис. 2. Профиль объема

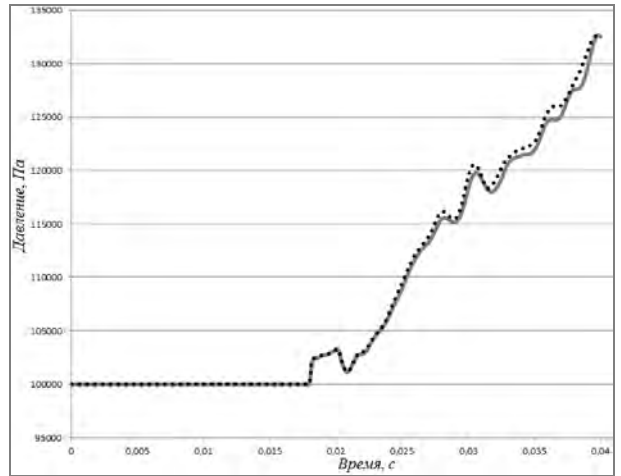


Рис. 3. Профиль давления

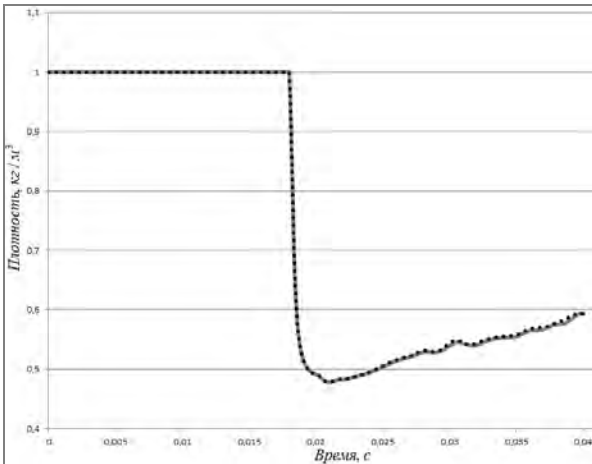


Рис. 4. Профиль плотности

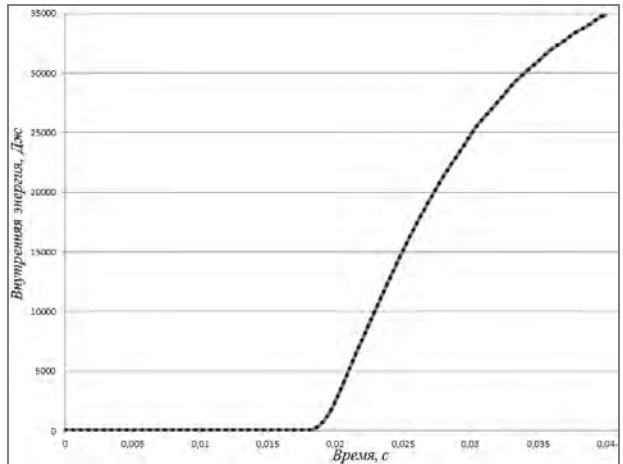


Рис. 5. Профиль энергии

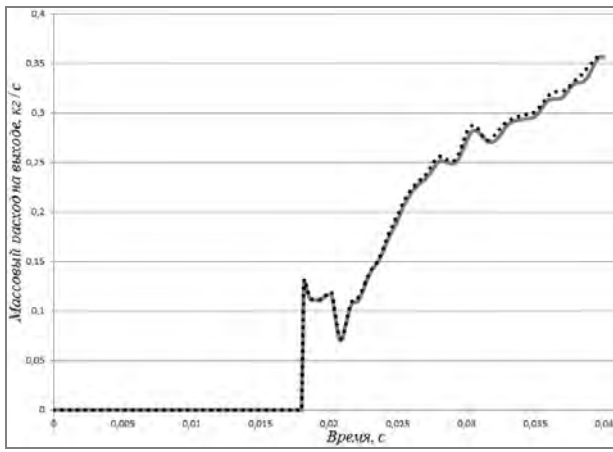


Рис. 6. Профиль массового расхода на выходе

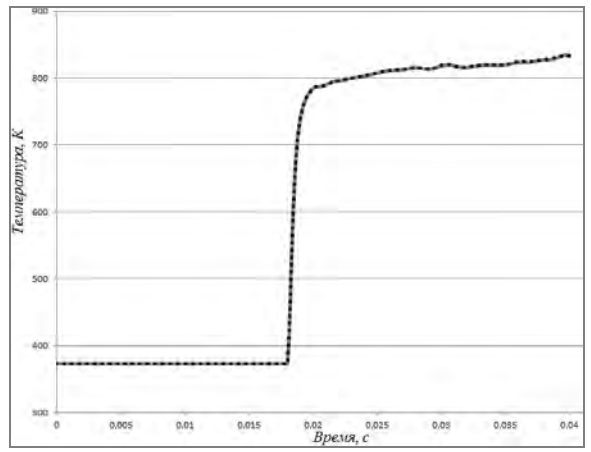


Рис. 7. Профиль температуры

Задача № 2.

В качестве еще одного примера, рассмотрим задачу взаимодействия подушки безопасности с преградой в виде плиты, материал которой по своим характеристикам близок к пенопласту. Конечно-элементная модель плиты состоит из 16 384 элементов, плотность материала $\rho = 20 \text{ кг/м}^3$. Узлы плиты закреплены по краям (рис. 8).

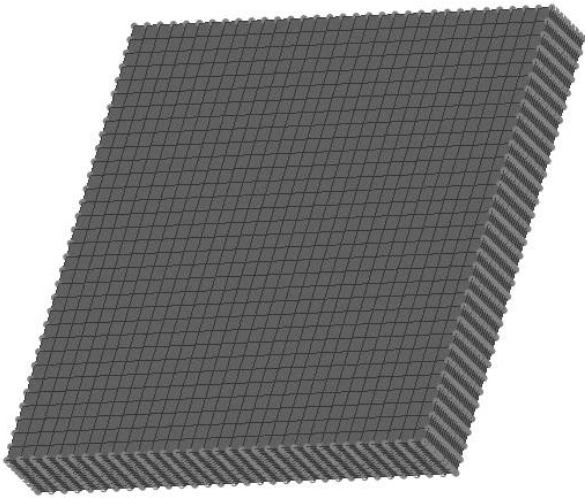


Рис. 8. Закрепление узлов плиты по краям

Для моделирования ткани подушки безопасности также использован упругий изотропный материал, применяемый для оболочечных и объемных элементов. Конечно-элементная модель подушки безопасности состоит из 4176 плоских 3-узловых элементов, плотность материала $\rho = 820 \text{ кг/м}^3$.

Начальная конфигурация задачи представлена на рис. 9. Время окончания счета задачи $t = 40 \text{ мс}$.

Параметры термодинамических свойств газа подушки безопасности, известные на начальном этапе расчета (входные данные):

- Теплоемкости: $C_v = 774$, $C_p = 1042$.

- Температура поступающего газа: $T_{in} = 800 \text{ К}$.
- Коэффициент пропускания и площадь отверстия вентиля: $c_{23} = 0,7$; $A_{23} = 0,001608 \text{ м}^2$.
- Коэффициент пропускания и площадь утечки из-за пористости ткани: $c_{23} = 0,1$; $A_{23} = 0,005 \text{ м}^2$.
- Плотность и давление окружающего воздуха: $p_e = 100000 \text{ Па}$, $A_{23} = 1 \text{ кг/м}^3$.

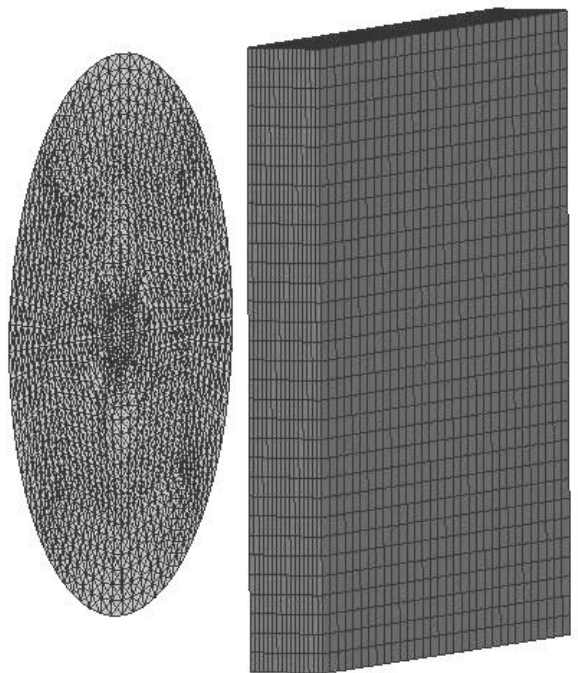


Рис. 9. Начальная конфигурация

На рис. 10 представлено распределение давления на конечный момент времени, полученное с помощью пакета программ ЛОГОС.

В таблице приведены значения максимального прогиба плиты.

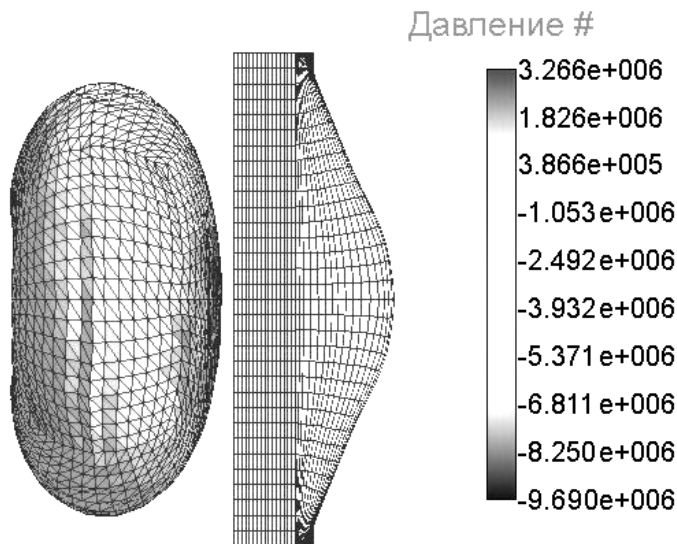


Рис. 10. Распределение давления

Максимальный прогиб плиты

Максимальный прогиб плиты на конечный момент времени, эталонное решение, м	Максимальный прогиб плиты на конечный момент времени, Логос-Прочность, м	Погрешность, %
0,149	0,146	2

Заключение

В работе представлено краткое описание существующих моделей подушек безопасности, а также рассмотрены подробно две из этих моделей: простая подушка безопасности и модель Ванга – Нефске, которые реализованы в модуле динамической прочности пакета программ ЛОГОС. Также описан применяемый подход вычисления объема подушки безопасности и изложены некоторые вычислительные алгоритмы.

Работоспособность функционала, позволяющего моделировать подушки безопасности, проверена на модельных задачах. Анализ расчетов показал хорошее согласие результатов рассмотренных задач с эталонным решением.

Литература

1. Дерюгин Ю. Н., Козелков А. С., Спиридонов В. Ф., Циберев К. В., Шагалиев Р. М. Многофункциональный высокопараллельный пакет программ ЛОГОС для решения задач теплопереноса и прочности // Сборник тезисов докладов Санкт-Петербургского научного форума «Наука и общество», Санкт-Петербург, 2012.

2. Циберев К. В., Авдеев П. А., Артамонов М. В., Борляев В. В. и др. Пакет программ

ЛОГОС. Функциональные возможности для решения задач прочности // Труды XIII международного семинара «Супервычисления и математическое моделирование». Саров, 2011.

3. Спиридонов В. Ф., Рябов А. А., Циберев К. В. и др. Основные принципы реализации пакета программ ЛЭГАК-ДК для расчета задач прочности и газодинамики на неструктурированных сетках // Сборник докладов 8-й научно-технической конференции «Молодежь в науке» / секция «Теоретическая и математическая физика», Саров, 2009. С. 153–160.

4. Корсакова Е. И., Дьянов Д. Ю., Симонов Г. П., Циберев К. В., Шувалова Е. В. Результаты верификации моделей упругопластического деформирования и разрушения, реализованных в пакете программ ЛЭГАК-ДК // Труды XII международного семинара «Супервычисления и математическое моделирование». Саров, 2010. С. 163–173.

5. Дьянов Д. Ю., Борляев В. В., Корсакова Е. И., Спиридонов В. Ф. и др. Пакет программ ЛЭГАК-ДК. Методы расчета газодинамических и упругопластических течений в лагранжевых переменных на неструктурированной сетке // Труды X Забабахинских научных чтений. Снежинск, 2010.

6. LS-Dyna keyword user's manual, volume 1. March 2001, version 960, 1420 с.

7. John O.Hallquist LS-Dyna theory manual. March 2006, 680 с.