



УДК 629.762+531.6.011.5+519.8

© Р. А. Пешков, Р. В. Сидельников, 2015

Анализ влияния конструктивных и газодинамических параметров ракет на ударно-волновые процессы в шахтной пусковой установке

Проведён анализ возможностей программного комплекса *ANSYS FLUENT* и верификация алгоритма исследований, используемого для решения задач раскрытия контейнерного подракетного пространства при влиянии на величину нагружения пускового контейнера и ракеты различных факторов: скорости выхода ракеты из контейнера, различных подходов к решению задач с подвижными границами, длины контейнера.

Ключевые слова: пусковой контейнер, численное моделирование, шахтная пусковая установка.

Период раскрытия контейнерного подракетного пространства начинается с момента, когда днище ракеты достигает верхнего среза пускового контейнера (ПК). В это время газы, находящиеся под давлением, истекают в окружающее пространство, воздействуя на элементы конструкции ПК и ракеты. При этом скорость истечения газа превышает скорость ракеты.

Большинство известных методик по исследованию газодинамических параметров в ПК и окрестности ракеты [1, 2] применялись для исследования газодинамических процессов в период движения ракеты в контейнере и не затрагивают период раскрытия контейнерного подракетного пространства, который имеет свои особенности, связанные прежде всего с характером ударно-волновых процессов. Существуют также методики расчёта, которые основаны на получении среднеобъёмных характеристик [3], позволяющие проводить анализ нагружения только внутри контейнера и на днище ракеты-носителя. Представленный в статье алгоритм позволяет получать газодинамические параметры во всей расчётной области с учётом вязкости газа и даёт возможность не только качественно, но и количественно без привлечения эксперимента анализировать влияние изменений в конструкции пусковой установки на величину нагрузок, действующих на контейнер и ракету-носитель.

С целью оценки возможностей численного моделирования на базе программного комплекса *ANSYS FLUENT*, его отработки и верификации используемой методики при исследовании газодинамических явлений, происходящих при старте ракеты, было проведено численное моделирование процессов. Программный комплекс *ANSYS FLUENT* имеет в своём арсенале разнообразные методы

динамического перестраивания сеток, необходимые для задания движения ракеты при раскрытии пускового контейнера. Отработка методики численного моделирования на базе *ANSYS FLUENT* проводилась путём сравнения расчётных результатов ударно-волновых нагрузок на ПК с результатами, полученными на натурной установке [3].

После анализа конструкций различных шахтных пусковых установок [4, 5] была принята для расчёта соответствующая схема (рис. 1).

В качестве основных параметров для расчетов выбраны: скорость выхода ракеты, избыточное давление и температуры в контейнере в момент выхода ракеты из ПК.

В процессе отработки расчётной модели исследований решались задачи определения влияния величины давления в ПК в момент

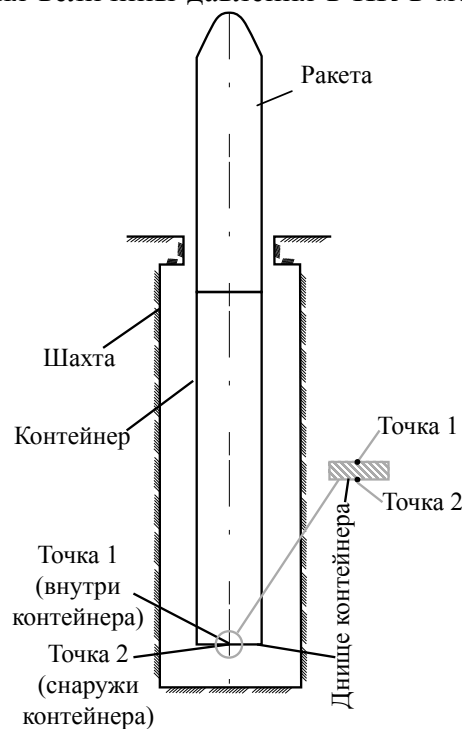


Рис. 1. Расчётная схема

раскрытия, длины ПК и скорости выхода ракеты из ПК на характер и интенсивность нестационарных процессов в пусковой установке (ПУ).

В ходе решения задач использовались следующие допущения и упрощения:

в начальный момент нижний срез ракеты находится на уровне верхнего среза ПК; внутри ПК задаются равномерно распределенные давление и температура;

моделирование проводилось в осесимметричной постановке, которая позволяет существенно снизить количество расчётных элементов и время расчёта;

параметры газа от порохового аккумулятора давления (ПАД) принимались соответствующими параметрам воздуха: показатель адиабаты $k = 1,4$; универсальная газовая постоянная $R = 8,3144621$ Дж/(моль·К). Плотность рассчитывалась на основании уравнения идеального газа:

$$\rho = \frac{p_{op}}{\frac{R}{M_w} T},$$

где ρ – плотность среды;
 M_w – молекулярная масса воздуха;
 p_{op} – рабочее давление;
 T – температура газа. Температура и давление окружающей среды в расчётной области вне контейнера принимались в соответствии с нормальными условиями;

стенки шахты и ПК принимались абсолютно гладкими, тонкими и не теплопроводными;

влияние трения на распространение ударной волны не учитывалось.

Алгоритм расчёта включал следующие этапы:

- построение сеточной модели;
- выбор модели перестроения сетки;
- задание физической модели газа;
- выбор схемы дискретизации по пространству.

На основании имеющейся геометрии (см. рис. 2) расчётной области строилась конечно-элементная двумерная сетка, симметричная относительно оси ракеты (для снижения

временных затрат и вычислительных ресурсов). Построение производилось инструментами сеточного генератора *ANSYS ICEM CFD*.

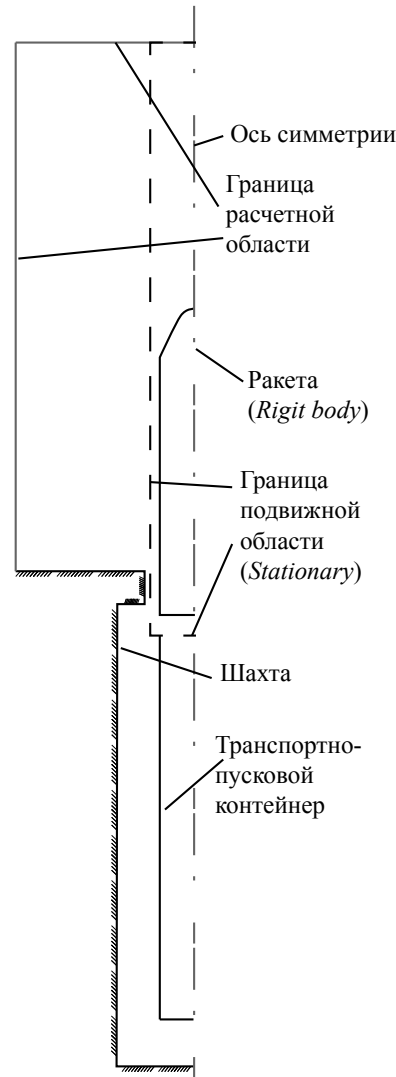


Рис. 2. Места расположения границ подобласти с подвижной сеткой

Как уже отмечалось, решение поставленной задачи предполагает использование подвижных сеток. Однако следует отметить, что возможны различные подходы к решению задач с подвижными границами, а именно использование динамических (*dynamic*) и скользящих (*sliding*) сеток.

Модель динамической сетки в *ANSYS FLUENT* используется для моделирования течений, где поверхность области изменяется со временем из-за движения границ области. Одна и та же модель динамической сетки может быть принята как для однофазных, так и для многофазных течений. Общие уравнения





переноса применяются для всех уравнений (турбулентности, энергии и др.).

Обновление сеточного объёма осуществляется программой на каждом временном шаге автоматически на основе нового положения границ. Интегральная форма уравнения сохранения для основного скаляра ϕ на произвольном контрольном объёме V , чья граница движется, записывается в виде:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_V \rho \phi dV + \int_{\partial V} \rho \phi (\bar{\mathbf{u}} - \bar{\mathbf{u}}_g) \cdot d\bar{\mathbf{A}} = \\ = \int_{\partial V} \Gamma \nabla \phi d\bar{\mathbf{A}} + \int_V S_\phi dV, \end{aligned} \quad (1)$$

где ρ – плотность среды;

$\bar{\mathbf{u}}$ – вектор скорости течения;

$\bar{\mathbf{u}}_g$ – скорость движения сетки;

$\bar{\mathbf{A}}$ – вектор к площади поверхности грани объёма V ;

Γ – коэффициент диффузии;

S_ϕ – источниковый член ϕ .

Здесь ∂V используется для обозначения границы контрольного объёма V .

Используя обратную функцию производной первого порядка, производную по времени в уравнении (1) можно записать как:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \phi dV = \frac{(\rho \phi V)^{n+1} - (\rho \phi V)^n}{\Delta t}, \quad (2)$$

где n и $n+1$ – величины на текущем и следующем шаге по времени соответственно.

Объём V на $(n+1)$ временном шаге находится по формуле:

$$V^{n+1} = V^n + \frac{dV}{dt} \Delta t, \quad (3)$$

где dV/dt – производная по времени контрольного объёма. Для того чтобы удовлетворить закон сохранения в сетке, производная по времени контрольного объёма вычисляется из:

$$\frac{dV}{dt} = \int_{\partial V} \bar{\mathbf{u}}_g \cdot d\bar{\mathbf{A}} = \sum_j^{n_f} \bar{\mathbf{u}}_{g,j} \cdot \bar{\mathbf{A}}_j, \quad (4)$$

где n_f – число граней контрольного объёма;

$\bar{\mathbf{A}}_j$ – j -й вектор к площади поверхности грани.

Конечное произведение $\bar{\mathbf{u}}_{g,j} \cdot \bar{\mathbf{A}}_j$ на каждой грани контрольного объёма вычисляется:

$$\bar{\mathbf{u}}_{g,j} \cdot \bar{\mathbf{A}}_j = \frac{\Delta V_j}{\Delta t},$$

где ΔV_j – изменение контрольного объёма j -й

поверхности на каждом временном шаге.

В технике скользящих сеток используются две или более сеточные области. Каждая область ограничена хотя бы одной интерфейсной зоной (*interface zone*) напротив такой же области. Две соседние интерфейсные зоны связаны между собой и образуют сеточный интерфейс (*mesh interface*). Две области с ячейками движутся относительно друг друга вдоль этого сеточного интерфейса, при этом все неконформные интерфейсы обновляются программой автоматически, когда обновляется сама сетка на каждом временном шаге. Следует отметить, что сама сетка не перестраивается, а меняется лишь положение узлов относительно двух противоположащих сеточных областей, соединенных между собой посредством сеточного интерфейса.

Общая формулировка уравнения сохранения для динамических сеток (1) используется и для скользящих сеток. Так как движущаяся сетка при использовании скользящих сеток не перестраивается, то все ячейки сохраняют свою первоначальную форму и объём. Как результат, изменение объёма ячейки по времени равно нулю, и уравнение (3) упрощается:

$$V^{n+1} = V^n,$$

тогда уравнение (2) преобразуется к виду:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \phi dV = \frac{[(\rho \phi)^{n+1} - (\rho \phi)^n] V}{\Delta t}.$$

Кроме того, уравнение (4) также сводится к более простому:

$$\sum_j^{n_f} \bar{\mathbf{u}}_{g,j} \cdot \bar{\mathbf{A}}_j = 0.$$

Уравнение (1) в сочетании с принятыми упрощениями может описывать поток при использовании подвижных сеток, однако при этом движение всех границ должно быть определено. Следует отметить, что в связи с тем, что сетка движется, решения уравнения (1) для скользящей сетки будут по своей сути нестационарными, так же как и для всех динамических сеток [6].

После выбора метода перестроения сеток (в нашем случае *sliding*) задаются параметры границ подобласти с подвижной сеткой (рис. 2). Подвижными задаются граничное условие стенки для ракеты и массив ячеек сетки. Дан-

ного типа границы обозначаются как *Rigid Body*. При этом закон движения определяется с помощью специальной пользовательской функции *Motion UDF/Profile*. Данная функция записывается на языке C++ и требует компиляции в бинарный файл. Границы, на которых происходит возникновение и уничтожение элементов, задаются типом *Stationary*. Это границы, перпендикулярные направлению движения. В нашем случае это граница выхода для сегмента сетки с ракетой (на ней ячейки удаляются) и границы стенки ПК и интерфейсов, связывающих подобласть сетки с ракетой с остальными подобластями расчётной области.

Задание физической модели процесса стандартно для всех задач, решаемых с помощью *ANSYS FLUENT*.

Выбираются модели физических процессов, которые необходимо учитывать. Так как в нашем случае течение газа турбулентное, то помимо основных уравнений (неразрывности, энергии, импульса, состояния) для расчёта газодинамических течений выбирается модель турбулентности. Для описания сверхзвуковых течений газа в расчётной области необходимо использовать высокорейнольдсовы модели турбулентности. В ходе расчёта были протестированы две модели турбулентности: *k-ε* и *SST*. Различия результатов по определению давления снаружи и внутри днища контейнера, полученные с помощью данных моделей турбулентности были минимальны, и дальнейшие расчёты проводились с использованием *k-ε* модели турбулентности.

Для решения нестационарной задачи распространения ударных волн большое значение имеет выбор схемы дискретизации уравнений.

На основании тестовых расчётов была подобрана комбинация схем, позволяющая получить достаточно быстро устойчивое сходящееся решение. Был выбран *Pressure-Velocity Coupling* решатель и для него параметр *Skewness Correction* задан равным 0. Схема дискретизации по времени задавалась по умолчанию – *First Order Implicit*, схема дискретизации по градиенту – *Least Squares Cell Based*, схема дискретизации по давлению – *Second Order*, схема дискретизации по плотности –

Second Order Upwind; все остальные схемы заданы по умолчанию для данного решателя.

Для обеспечения сходящегося решения шаг по времени задавался не меньше 0,0005 с.

Отладка алгоритма исследований, реализованного на базе программного комплекса *ANSYS FLUENT*, проводилась путём сравнения результатов численного моделирования с данными экспериментальных исследований.

Для начальной оценки динамики нагружения на ПУ были выбраны две точки (рис. 1) на днище контейнера – изнутри и снаружи, которые являются наиболее интересными с точки зрения нагруженности и позволяют в большей мере оценить точность моделирования газодинамических процессов в расчётной области.

Зависимости давления на днище изнутри и снаружи контейнера от времени (рис. 3) по мере выхода ракеты из ПК, полученные с помощью программного комплекса *ANSYS FLUENT*, имеют хорошее качественное совпадение с результатами, представленными в [3].

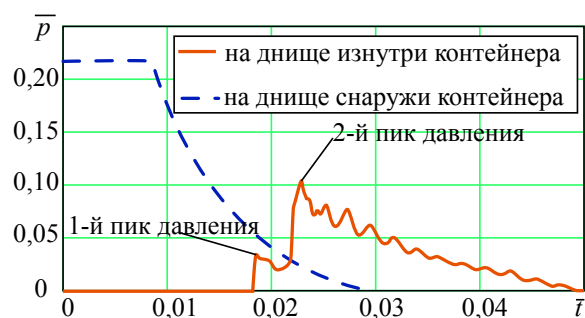


Рис. 3. Изменение относительного давления на днище контейнера от относительного времени

Первое возмущение среды в ПУ вызывается пусковой ударной волной в момент выхода нижнего обтюратора ракеты из контейнера. Дойдя до дна ПУ, эта волна отражается и вызывает второй пик давления в точке снаружи пускового контейнера. При раскрытии ПК в результате истечения продуктов сгорания давление в нём падает и к моменту прихода прямой волны сжатия к дну ПУ составляет 20–30% от давления раскрытия. В результате двойного отражения прямой волны сжатия от дна ПУ и днища ПК давление в ней повышается в 4–5 раз и на днище ПК образуется наружный перепад давления, который приводит к значительной осевой силе, направленной вверх.



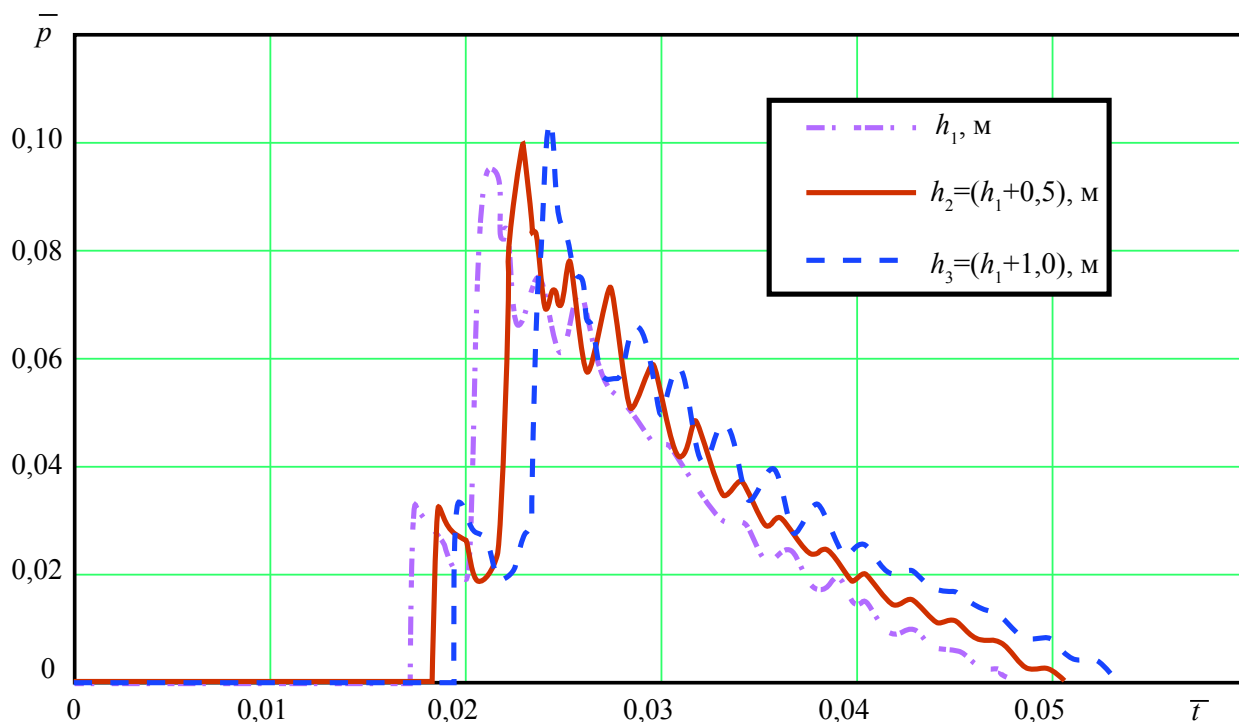


Рис. 4. Изменение относительного давления в относительном времени в точке 2 на днище снаружи контейнера при различной длине контейнера h_i

С целью оценки влияния скорости выхода ракеты из ПК и длины контейнера на величину нагрузок на ПУ, а в частности – на время прихода ударных волн и значения максимальных давлений в них, были проведены соответствующие оценочные расчёты.

Также был проведен анализ влияния различных подходов к построению расчётной модели (различных методик моделирования подвижности объектов в *ANSYS FLUENT*), который показал, что в целом результаты не отличаются, однако при использовании динамических сеток наблюдаются меньшие осцилляции на графиках изменения давления на днище внутри контейнера, и происходит увеличение величины давления ударной волны на 2%.

Изменение скорости выхода ракеты не повлияло на величину нагрузок на ПК, изменение давления ударной волны при различной скорости составило менее 5%, а время её прихода практически не изменилось.

Изменение длины на 1 м привело к увеличению давления в первом пике на 2%, во втором – на 3,5%, к увеличению времени прихода первой ударной волны на 10%, второй – на 4% (рис 4). Таким образом, можно сделать вывод, что длина контейнера оказывает значительное влияние на величину давления

на ТПК.

Следует отметить, что все значения на графиках (рис. 3, 4) представлены в относительных величинах.

Заключение

По результатам анализа и систематизации полученных данных установлено, что определяющую роль на уровень нестационарных давлений в ПУ играет давление раскрытия ПК: его увеличение ведет к общему повышению давления в ПУ во всех периодах нестационарной фазы.

В ходе исследований был проведен анализ влияния различных факторов (скорости выхода ракеты из ПК, различных подходов к решению задач с подвижными границами, длины контейнера) на величину нагружения ПК и сделаны выводы о том, что из перечисленных параметров только длина контейнера оказывает существенное влияние на величину давления на ПК.

В результате отработки и верификации используемой методики численного моделирования на базе *ANSYS FLUENT* при решении задач раскрытия подракетного пространства при выходе ракеты из контейнера можно сделать вывод, что, несмотря на значительные упрощения расчётных моделей, сделанные в

ходе допущений, удалось получить неплохие результаты для инженерных оценок нагруженности в рамках экономичной модели.

Расчёты ударно-волновых нагрузок на ПУ по приведённому алгоритму исследования позволили выявить ряд особенностей в нагружении конструкции ПК. Так, например, величина давления раскрытия практически не влияет на скорость спада давления в контейнере, при этом в контейнере наблюдаются волны разрежения-сжатия, которые в сумме с отражённой ударной волной, воздействующей на днище снаружи ПК, дают суммарную силу значительной величины, действующую на контейнер в осевом направлении в сторону движения ракеты. При увеличении давления раскупорки эта осевая сила значительно увеличивается, что в случае пренебрежения данным фактором может привести к разрушению конструкции ПК и элементов ПУ.

Список литературы

1. *Абанее Е. Р.* Пример численного решения двумерной газодинамической задачи в геоме-

трически изменяющейся расчётной области // Вестник ТГПУ. Сер.: Естественные и точные науки. 2006. Вып. 6. С. 98–100.

2. *Барсуков В. Д.* Анализ модельного варианта начального движения ракеты при запуске из затопленной шахты // Изв. вузов. Авиационная техника. 2005. № 4. С. 11–13.

3. *Конюхов С. Н.* Миномётный старт межконтинентальных баллистических ракет. Днепропетровск: НАН, НКА Украины, Институт технической механики, ГKB «Южное», 1997. 211 с.

4. *Сергеев И. Д.* Оружие России. Т. 4: Вооружение и военная техника Ракетных войск стратегического назначения. М.: Военный парад, 1997. 404 с.

5. *Колесников С. Г.* Стратегическое ракетно-ядерное оружие. М.: Арсенал-Пресс, 1996. 128 с.

6. ANSYS FLUENT Theory Guide. Lebanon: Fluent Inc, 2011. 816 p.

Поступила 11.11.14

Пешков Руслан Александрович – преподаватель ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ), г. Челябинск.

Область научных интересов: численное моделирование сверх- и гиперзвуковых течений летательных аппаратов.

Сидельников Рудольф Васильевич – кандидат технических наук, доцент ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ), г. Челябинск.

Область научных интересов: динамика механических систем, аэрогазодинамика летательных аппаратов.

