

Обтекание тонкого стакана сверхзвуковым потоком и определение условий его схлопывания

Б. В. Юдин^{1}, К. А. Набережных¹*

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск,
Российская Федерация

* e-mail: tarpan_sib@mail.ru

Аннотация. В работе моделируется поведение тонкой цилиндрической оболочки, находящейся в спутном сверхзвуковом потоке. Показана возможность потери устойчивости вследствие перепада давления на внешней и внутренней поверхностях стакана.

Ключевые слова: устойчивость тонкой оболочки, внутреннее сверхзвуковое течение, давление торможения

Supersonic flow about thin cylindrical shell and shell stability research

B. V. Yudin^{1}, K. A. Naberezhnykh¹*

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

* e-mail: tarpan_sib@mail.ru

Abstract. The paper presents behavior of a thin cylindrical shell in axial supersonic flow. The possibility of stability loss due to pressure difference on the outer and inner surfaces of the shell is shown.

Keywords: stability of thin shell, inner supersonic flow, total pressure

Введение

При запуске неуправляемого реактивного снаряда в пусковой трубе остается пусковой стакан. Изредка возникали случаи схлопывания стакана, что затрудняло последующее его извлечение. Целью настоящей работы является анализ и моделирование условий схлопывания стакана для последующего решения этой проблемы, т.е. для исключения схлопывания.

Метод исследования

Предварительные шаги к созданию модели были сделаны ранее: аналитическая предварительная модель [1], и уточненная численная модель [2], результаты доложены на конференциях. Суть предложенной модели явления заключается в следующем:

1) статическое давление при истечении сверхзвуковой струи из сопла Лавалю во внешнюю область выравнивается с давлением внешней области, т.е. минимально возможное давление внутри стакана составляет 1 атмосферу;

2) на передней кромке любого препятствия, попадающего в сверхзвуковую струю, садится прямой скачок. За ударной волной в этом случае восстанавливается давление торможения, которое в свою очередь соответствует давлению в камере сгорания ракетного двигателя. Максимально возможное давление на наружной стенке стакана составляет 150 атм;

3) из-за разности давлений между областями – наружной стенкой стакана, которая находится за прямым скачком, и пусковой трубы и внутренней областью течения сверхзвуковой струи внутри стакана реализуется перепад давления.

Аналитическая модель [1], учитывающая факторы 1 и 2, показала предельно возможный перепад давления в 150 атмосфер.

Анализ устойчивости тонкой цилиндрической оболочки [1] показал, что граница устойчивости ее соответствует перепаду давления 60 атмосфер, что много меньше полученного предельного перепада давления 150 атм.

Возможной причиной может стать нерасчетный режим течения сверхзвуковой струи, с одной стороны, вследствие перекрытия сечения стаканом и падение давления в зазоре между стаканом и пусковой трубой вследствие сноса избыточного давления вниз по потоку, т.к. в нижней части пусковой трубы давление атмосферное.

Для проверки уточненной гипотезы было выполнено численное моделирование.

Была выполнена 3-D модель в пакете Modeling. На модели построена сетка с разной плотностью средствами пакета Mesh. При этом в областях с геометрическими особенностями: узкими каналами, резкими изменениями сечения, плотность сетки максимальна, размеры ячеек минимальны. На рис. 1 представлена сетка в расчетной области на передней кромке стакана.

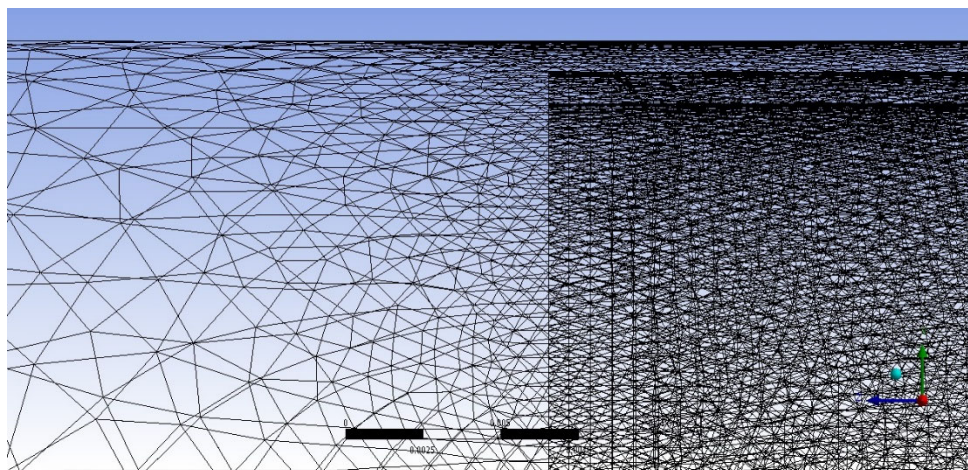


Рис. 1. Расчетная сетка

Расчетная модель – явная.

Течение сверхзвуковое.

Модель вязкости по Сатерленду.

Уравнение энергии учитывается.

Химический состав среды – воздух, т.к. проверяется сама модель потери устойчивости, а не ее точные значения. В дальнейшем химический состав будет приведен в соответствие с составом продуктов горения топлива.

Граничные значения: на входной границе – условно, на срезе сопла определяется скоростной поток – Inlet Velocity со скоростью 1000 м/с, с температурой 500 К, давлением 15 атм; на выходной границе свободный скоростной поток – Outlet Velocity; остальные границы – непроницаемая стенка – Wall.

Результаты

Главным критерием достоверности модели является перепад давления между наружной и внутренней стенкой стакана. На рис. 2 показаны изолинии статического давления. Из рис. 2 видно безградиентное распределение давления в цилиндрической части трубы после истечения из сопла до столкновения струи с передней кромкой стакана. После чего в центральной области садятся косые скачки уплотнения. За косыми скачками давление растет, но значительно меньше, чем за прямым скачком, что явствует из следующего рис. 3.



Рис. 2. Распределение статического давления в расчетной области

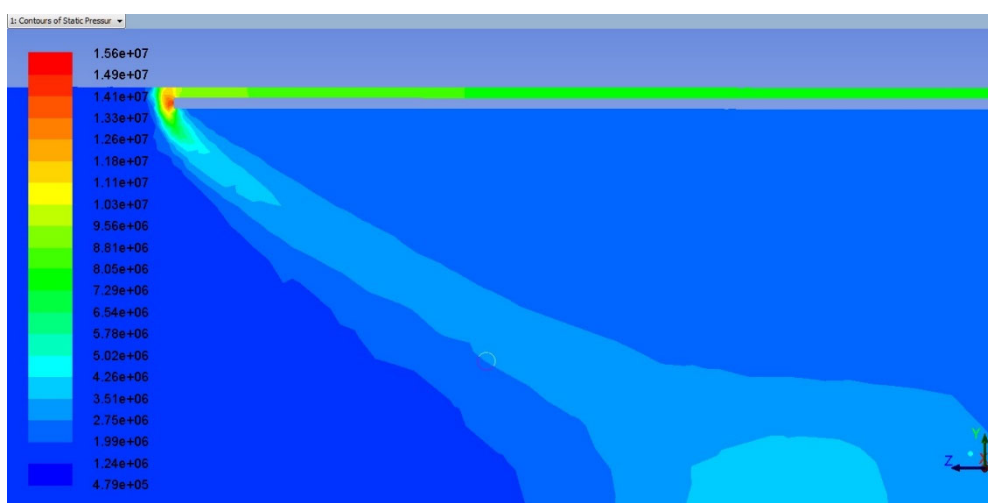


Рис. 3. Распределение давлений вблизи передней кромки стакана

Из рис. 3 видно, что давление внутри стакана за косым скачком составляет порядка 20–30 атмосфер. За прямым скачком на передней кромке стакана действительно давление восстанавливается до давления торможения – 150 атм. Но далее в канале между внешней стенкой стакана и внутренней поверхностью трубы давление падает, т.к. нижняя (по потоку) часть канала открыта в атмосферу, и давление в этой области постепенно снижается.

Волновая картина, отражающая расположение скачков в виде изолиний чисел Маха, наглядно показана на рис. 4.

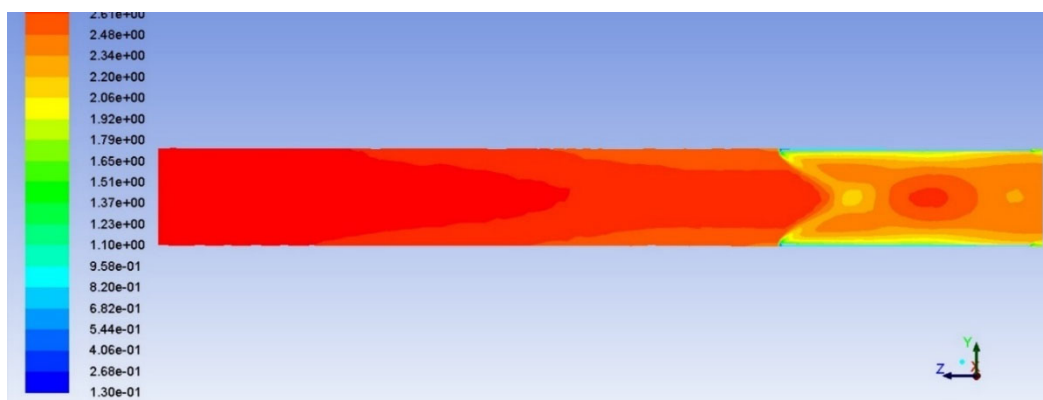


Рис. 4. Распределение числа Маха в области течения

На рисунке явно видны области ромбической структуры, характерные для истечения сверхзвуковой струи в затопленное пространство. Область течения вблизи передней кромки стакана в более крупном масштабе представлена на рис. 5.

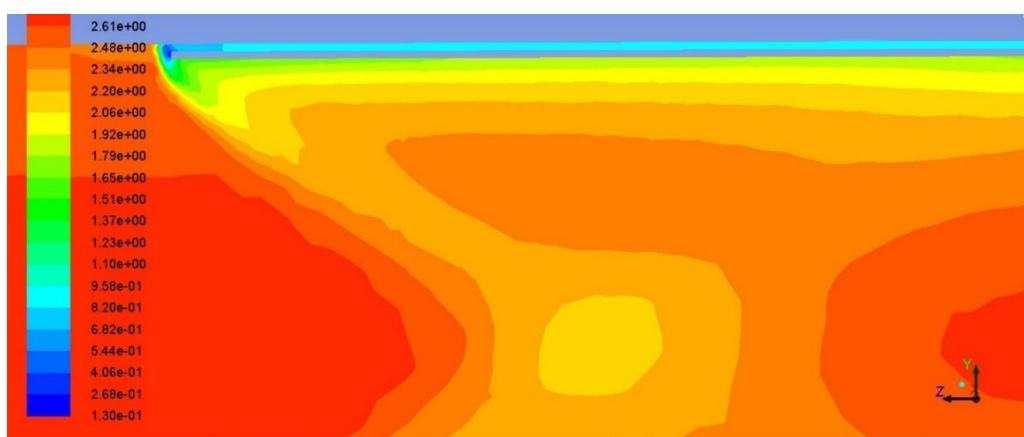


Рис. 5. Распределение скоростей вблизи передней кромки стакана и на его внешней поверхности

В тоже время в зазоре между внешней стенкой стакана и внутренней поверхностью пусковой трубы скорость значительно ниже. Здесь течение происходит

в развитом турбулентном пограничном слое, что видно по распределению температуры, представленному на рис. 6.

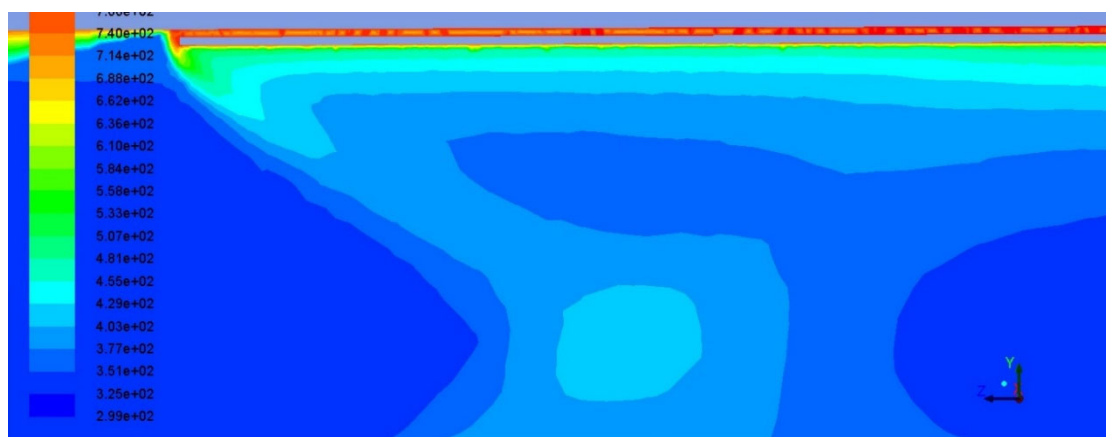


Рис. 6. Распределение температур в области течения

Выводы

1. Численный эксперимент показал, что давление в струе, движущейся внутри стакана, составляет 30 атмосфер, что обусловлено тем, что стакан по диаметру меньше, чем диаметр свободной сверхзвуковой струи при истечении в атмосферу.

2. Перепад давлений между внешней и внутренней стенкой стакана составляет порядка 60 атмосфер, что соответствует выполненным ранее расчетам [1] условий устойчивости оболочки при наличии избыточного внешнего давления.

3. Результат численного моделирования подтверждает допустимость использования выбранной модели для объяснения случаев схлопывания стакана при старте ракеты.

4. Дальнейшие исследования будут проведены на реальной геометрии экспортируемой из 3-D CAD модели, а химический состав газа будет приведен в соответствие с продуктами горения топлива.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Биргер И. А. и др. Расчет на прочность деталей машин: Справочник / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Г. Б. Иосилевич. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1993. – 640 с.

2. Набережных К.А, Юдин Б.В. Изучение устойчивости оболочки при внешнем сжатии / 70-я Студенческая научная конференция СГУГиТ. – Сборник тезисов докладов. – Новосибирск, СГУГиТ, 4 – 9 апреля 2022 г.

© Б. В. Юдин, К. А. Набережных, 2022