

## Исследование устойчивости оболочки при обтекании сверхзвуковым потоком в трубе

*К. А. Набережных<sup>1\*</sup>, Б. В. Юдин<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация

\* e-mail: kirillnaberezhnykh@mail.ru

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

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

## Stability research of thin shell in supersonic flow in a pipe

*K. A. Naberezhnykh<sup>1</sup>, B. V. Yudin<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

\* e-mail: kirillnaberezhnykh@mail.ru

**Abstract.** The paper present 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 и при воздействии струи газов на стакан, остающийся в пусковой трубе, происходили случаи его схлопывания.

### *Метод исследования*

Для объяснения этого была предложена модель [1]:

1) статическое давление при истечении из сопла Лавалья с нормальным полным расширением в расчетном режиме составляет 1 атмосферу.

2) с другой стороны, на передней кромке стакана возникает прямая ударная волна, скачок давления происходит до значения торможения, т.е. примерно 100- 150 атм.

3) Из-за перепада давления между наружной стенкой стакана, которая находится за прямым скачком, пусковой трубы и внутренней областью – с расчетным течением сверхзвуковой струи с давлением 1 атмосфера, который и является причиной схлопывания стакана.

4) Для оценки устойчивости стакана была использована модель [2].

Была выполнена предварительная оценка, которая показала, что перепад давления между наружной и внутренней стенкой стакана, при котором возможна потеря устойчивости составляет порядка 60 атмосфер.

Предельное значение, которое может быть реализовано при торможении за прямым скачком, и атмосферном давлении сверхзвуковой струи составляет 150 атмосфер. Выполненный одномерный аналитический подход позволил сделать оценку порядка значений и показал допустимость такой модели.

Следующим шагом должен стать численный эксперимент, с использованием учебного пакета ANSYS, что и было выполнено в настоящей работе.

Также была выполнена 3-D модель в пакете Modeling. На модели построена сетка с разной плотностью при помощи средств пакета Mesh. При этом в областях где сконцентрированы геометрические особенности модели, т.е. узкие каналы и резкие изменения сечения, плотность сетки стала максимальной, а размеры ячеек минимальны. На рисунке 1 представлена сетка в расчетной области на передней кромке стакана.

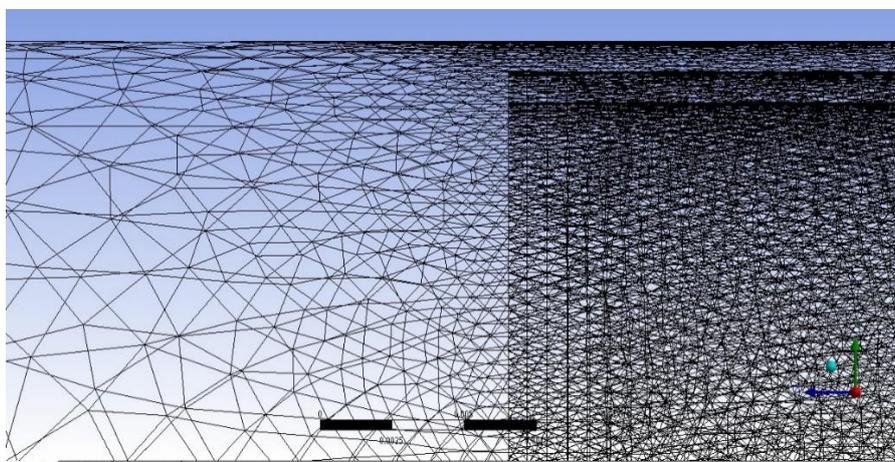


Рис. 1. Расчетная сетка

Расчетная модель – явная. Течение – сверхзвуковое. Модель вязкости по Са-терленду. Сделана с учетом уравнений энергии. Газ на данном этапе принят – воздух, точное значение химического состава, с термодинамическими параметрами будет уточнен для реальных продуктов сгорания при следующем приближении.

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 – стенка – Wall.

### ***Результаты***

В результате расчета получены значения перепад давлений между областью с давлением торможения и областью со свободным течением сверхзвуковой струи, что подтверждает правильность выбранного подхода. На рисунке 2 показаны изолинии статического давления в области течения модели.

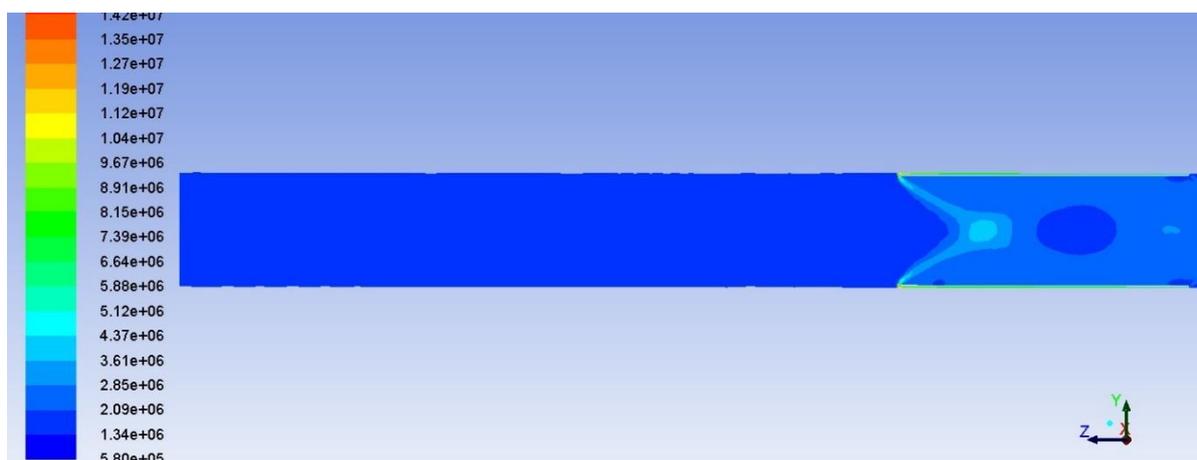


Рис. 2. Распределение статического давления в расчетной области

Из рисунка явно видно, что течение в цилиндрической части трубы после истечения из сопла до столкновения струи с передней кромкой стакана спокойное. После чего в центральной области садятся косые скачки давления. На передней кромке стакана садится прямой скачок, что видно из рисунка 3.

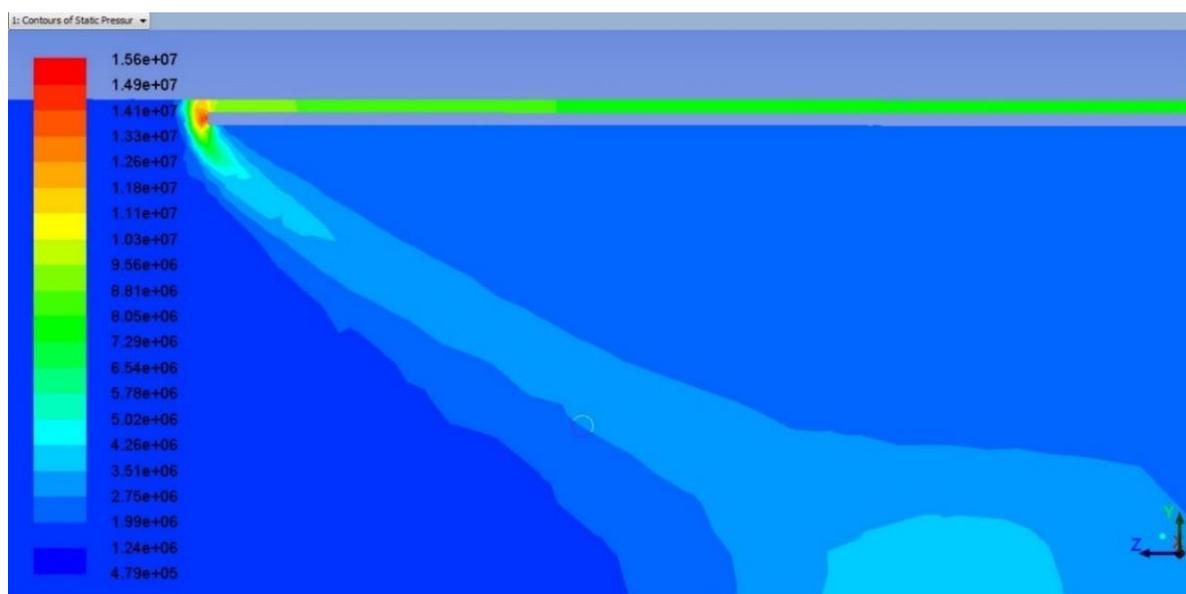


Рис. 3. Распределение давлений вблизи передней кромки стакана

Скорости удобно представлять в виде чисел Маха. Распределение скоростей представлено на рисунке 4. В ходе численного эксперимента получен перепад давлений между областями: внешняя стенка стакана / внутренняя стенка стакана, что составляет

$$80 - 20 = 60 \text{ атм.}$$

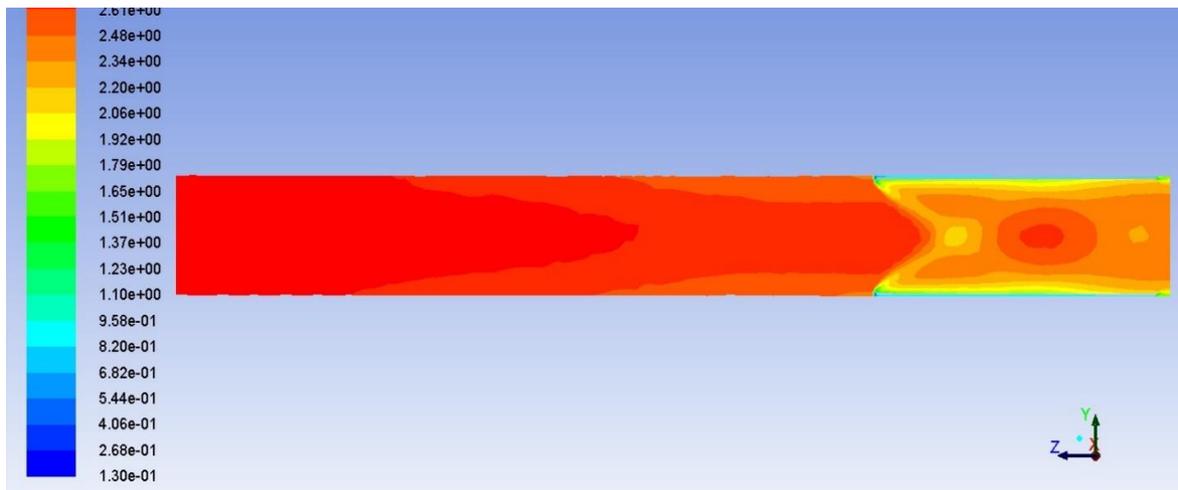


Рис. 4. Распределение числа Маха в области течения

Данный результат хорошо согласуется с предложенной моделью.

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.

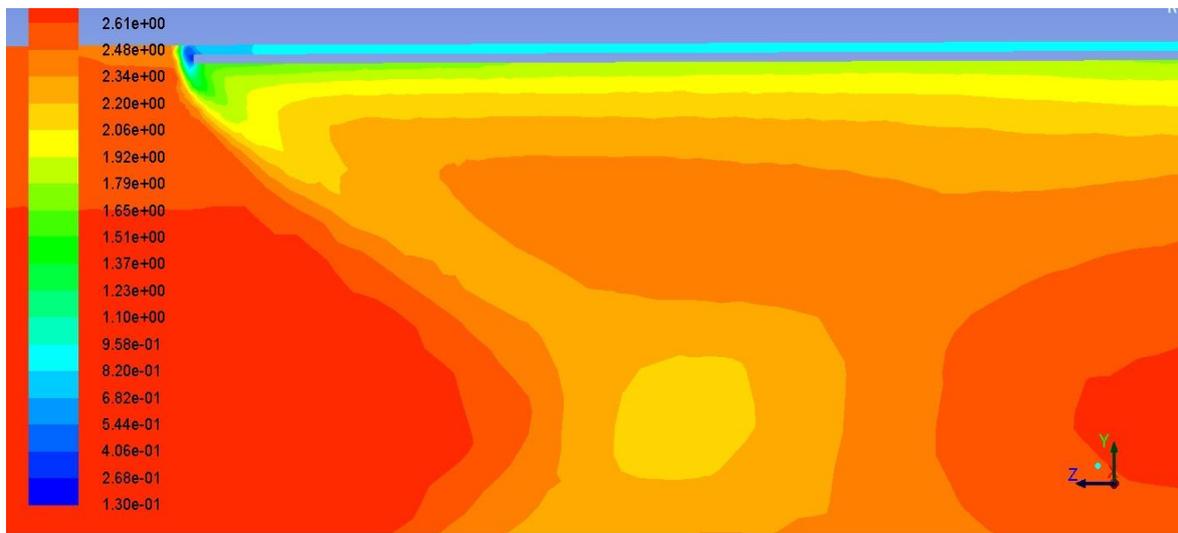


Рис. 5. Распределение скоростей вблизи передней кромки стакана и на его внешней поверхности

Из рисунка видна ромбическая структура волн сжатия/разряжения внутри стакана, и низкие скорости течения в зазоре между стаканом и пусковой трубой.

Причиной этого является развитый турбулентный пограничный слой, толщина которого соизмерима с зазором, что видно по распределению температуры, представленному на рисунке 6.

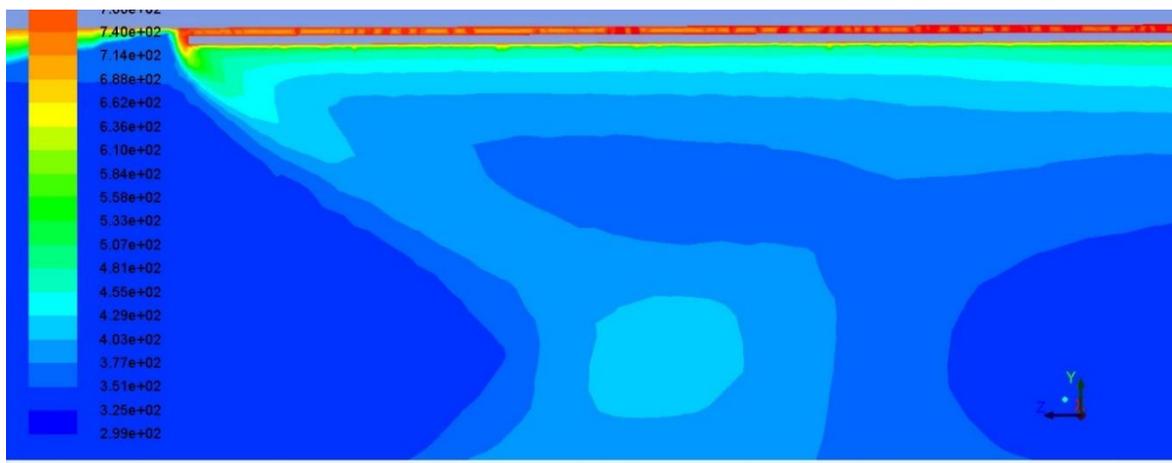


Рис. 6. Распределение температур в области течения

### ***Выводы***

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

2. По результатам численного моделирования можно утверждать допустимость выбранной модели для объяснения случаев схлопывания стакана при старте ракеты.

3. На следующем этапе будет уточнены:

- а) термодинамические параметры струи;
- б) точная модель области течения, экспортируемая из 3-D модели фактической геометрии расчетной области, выполненной в пакете SolidWorks.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Набережных К. А, Юдин Б. В «Изучение устойчивости оболочки при внешнем сжатии» Тезисы конференции «Студенческая научная конференция (СНК)» Новосибирск с 4 по 9 апреля 2022 года, в СГУГиТ.

2. 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.

© К. А. Набережных, Б. В. Юдин, 2022