

УДК 532.529+629

**О ВОЗМОЖНОСТИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
КВАЗИСТАЦИОНАРНЫХ КОЛЕБАНИЙ ДОННОГО ДАВЛЕНИЯ
В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ**

**ABOUT POSSIBILITY OF NUMERICAL CALCULATIONS OF QUASI
STATIONARY OSCILLATIONS OF BASE PRESSURE IN SUPERSONIC FLOW**

Продан Николай Васильевич
инженер,
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

Prodan Nikolai Vasilievich
Engineer,
ITMO University, Saint Petersburg

Аннотация. В работе исследуется возможность численного моделирования квазистационарных низкочастотных колебаний донного давления в сверхзвуковых течениях с внезапным расширением. До начала расчетов было выполнено тестирование широко представленных в современных коммерческих вычислительных пакетах моделей турбулентности: k - ω модель турбулентности, модель Realizable k - ϵ , модель RNG k - ϵ , SAS модель, стандартная SST (Shear Stress Transport) k - ω модель, Transition SST модель. Проведенное тестирование показало, что наилучшие результаты при расчетах сверхзвуковых отрывных течений, характерных для многосопловых блоков и донных частей ракет, дают Realizable k - ϵ и Transition SST-модели турбулентности. В настоящей работе приводятся результаты расчетов колебательного цикла при помощи Realizable k - ϵ и Transition SST-моделей турбулентности.

Annotation. This article describes the research of possibility of numerical simulation of quasi stationary low-frequency oscillation of base pressure in supersonic flow with sudden expansion. Tests of turbulence models in widely represented computational packages were conducted before the calculations, such as: k - ω turbulence model, Realizable k - ϵ model, RNG model k - ϵ , SAS model, standard SST (Shear Stress Transport) k - ω model, Transition SST model. Conducted tests has showed that the best results for supersonic separated flow. This type of flow has application in multi nozzle blocks and base parts of the rocket. In the current work calculation results of oscillation cycle with model were given for Realizable k - ϵ and Transition SST turbulence models.

Ключевые слова: донное давление, низкочастотные расходные колебания, течение с внезапным расширением.

Keywords: base pressure, low-frequency consumption oscillations, flow with sudden expansion.

Введение

Течения в окрестности донного среза являются классическим объектом исследования [1]. В последнее время интерес к проблеме возник с новой силой в связи с необходимостью организации горения в сверхзвуковом потоке. Одним из перспективных способов является организация сверхзвукового течения в окрестности обратного уступа [2], за которым образуется рециркуляционное течение с медленным горением, которое и стабилизирует поток. Известно, что в течениях с внезапным расширением возможно возбуждение низкочастотных колебаний давления, которые имеют расходную природу, т.е. определяются мгновенным нарушением баланса газа, втекающего в донную область и эжектируемого из неё [3]. Существует необходимость уметь рассчитывать такие колебания. Ранее были выполнены тестовые расчеты стационарных отрывных течений с внезапным расширением [4], которые выявили преимущества и недостатки различных моделей турбулентности и позволили остановиться на Realizable k - ϵ и Transition SST-моделях турбулентности.

Первая модель при небольшом перепаде давления на срезе сопла и в окружающей среде обеспечивает получение надежных данных о распределении давления по оси струи, донном давлении, распределении давления по стенкам сопла и эжектора. Хорошую точность удается получить на достаточно грубой сетке без применения каких-либо специальных приемов и ухищрений. Transition SST модель турбулентности обеспечивает лучшее совпадение с результатами эксперимента в случае большого перепада давления между срезом сопла и окружающей средой. Она более требовательна к разностной сетке, граничным и начальным условиям, отличается существен-

но большим временем счета. Вместе с тем, Transition SST модель гарантированно позволяет получить качественно верную картину ударно-волновой структуры при приемлемой точности определения распределения давления по оси струи. Понятие газодинамического разрыва, детонационной волны, ударно-волновой структуры рассмотрено в работах [5–7].

Проблема моделирования колебаний может быть разделена на две:

1) моделирование слоя смешения на границе струи, его взаимодействия со стенкой, эжекции газа из донной области (здесь лучше работает Realizable k-ε и Transition SST-модель турбулентности);

2) моделирование элементов ударно-волновых структур, таких как отражение косога скачка уплотнения от стенки [8], а также отражение косога скачка от оси симметрии [9] с образованием диска Маха.

В работе выполнено сравнение результатов расчетов при помощи двух упомянутых выше моделей турбулентности.

Методика расчета

На рисунке 1 представлена схема расчетной модели, которая образует расчетную область. Расчетная область ограничена внутренней областью трубы, с одной стороны ограничена соплом, с другой имеет свободный выход в окружающее пространство с нормальными условиями.

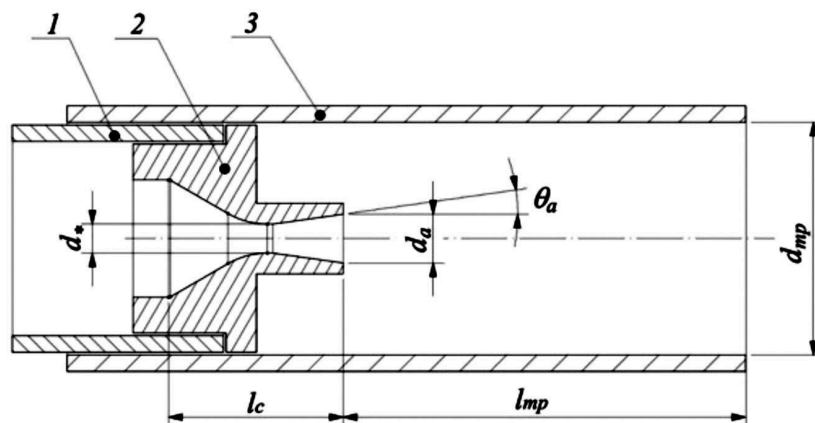


Рисунок 1 – Схема расчетной модели:

1 – ресивер; 2 – сверхзвуковое сопло; 3 – цилиндрическая труба;
 d_a – диаметр среза сопла; $d_{тр}$ – диаметр трубы, d_* – диаметр критического сечения сопла;
 l_c – длина сопла; $l_{тр}$ – длина трубы; θ_a – угол полураствора сопла

Методика расчета заключается в численном решении системы уравнений, содержащая уравнения Навье-Стокса. Для замыкания системы уравнений используются различные модели турбулентности, в основу которых положено понятие турбулентной вязкости [10].

Задача решается в двумерной осесимметричной постановке, в качестве рабочей среды используется воздух, сжимаемость учитывается переменной плотностью, рассчитываемой по уравнению идеального газа. В качестве граничных условий на входной границе перед соплом задаются параметры торможения газа: давление 0–90 ата, температура 300К и характеристики турбулентной вязкости в виде гидравлического диаметра и интенсивности турбулентности. На выходной границе задаются параметры окружающей покоящейся среды. На твердых стенках задаются условия прилипания и не протекания. Единственным изменяемым параметром в расчетах является полное давление, задаваемое перед соплом.

Режимы рассматриваемого сверхзвукового струйного течения в канале могут, как не зависеть от времени и быть стационарным, так и зависеть от времени и быть нестационарными. Нестационарные процессы характеризуются наличием низкочастотных колебаний, которые носят квазистационарный характер, что позволяет использовать квазистационарную модель газодинамического расчета.

Квазистационарная модель заключается в получении стационарного решения для фиксированного значения давления перед соплом. Далее, полученное решение используется в качестве начального условия для следующего расчета, в котором полное давление перед соплом меняется с определенным шагом. В результате таких дискретных решений по давлению строится зависимость давления в донной области от полного давления перед соплом и от времени на нестационарных режимах течения.

Анализ результатов

На рисунке 2 представлена зависимость давления в донной области от полного давления перед соплом.

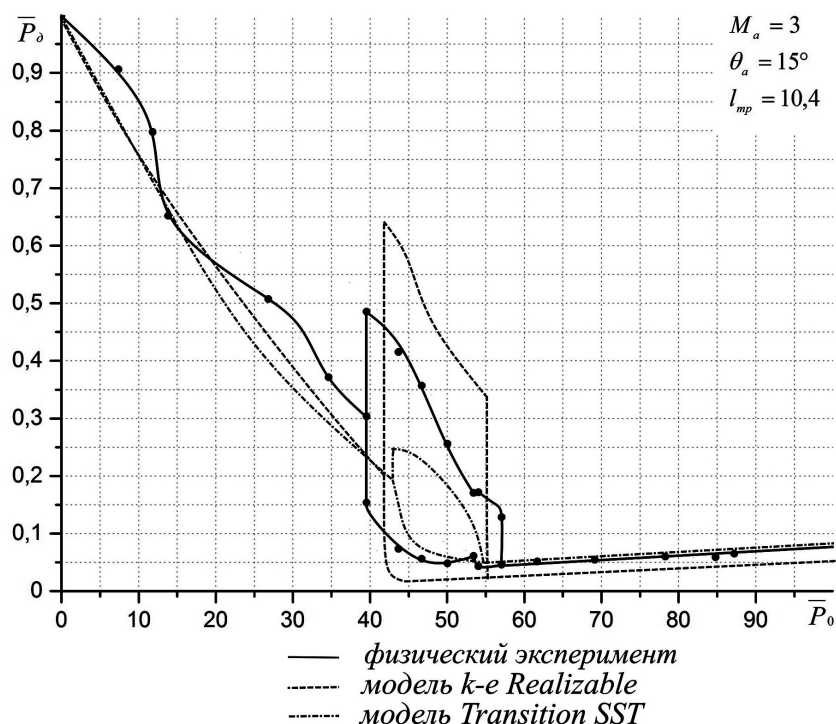


Рисунок 2 – Экспериментальная и расчетная зависимость давления в донной области от полного давления перед соплом:

Сопло $M_a = 3$; угол полураствора сопла $\theta_a = 15$; длина трубы $l_{rp} = 10,4$

На графике видно, что расчетные зависимости имеют разный характер отличия от экспериментальной зависимости. Если рассматривать стационарные режимы видно, что модель Transition SST лучше описывает автомодельный режим, когда зависимость давления в донной области линейно зависит от полного давления перед соплом. Модель Realizable $k-\epsilon$ в данном случае занижает величину давления в донной области. На режиме открытой донной области, когда она связана с окружающей средой результаты расчета имеют похожие значения и занижают величину давления в донной области.

Рассмотрим нестационарный режим течения, на котором наблюдаются наибольшие отклонения значений от экспериментальной зависимости, причем характер этих отклонений различен. Если расчеты с моделью дают значительно больший размах колебаний, то расчеты с моделью, наоборот, занижают величину амплитуды колебаний давления в донной области.

Сравним форму колебательного цикла. На рисунке 3 представлена форма колебательного цикла, полученная в результате использования модели турбулентности Transition SST. Для нее характерно сходство с гармоническими колебаниями и отсутствие области, соответствующей открытой донной области. В результате можно сделать вывод о том, что при моделировании течения в канале донная область остается постоянно закрытой и газ из окружающей среды не попадает в нее. Такие колебания можно отнести к псевдогармоническим.

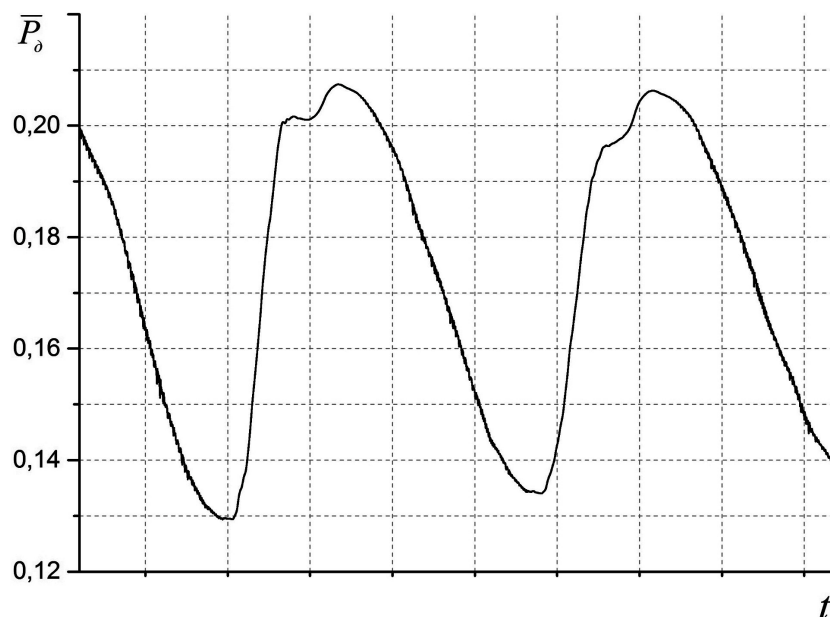


Рисунок 3 – Форма колебательного цикла. Модель Transition SST. Полное давление $P_0 = 45$ ата

На рисунке 4 представлена форма колебательного цикла для расчета с моделью турбулентности Realizable k-ε. Сразу обращает на себя внимание практически мгновенный рост величины донного давления из точки минимального значения и последующее её плавное понижение с растянутой зоной медленного разряжения в донной области.

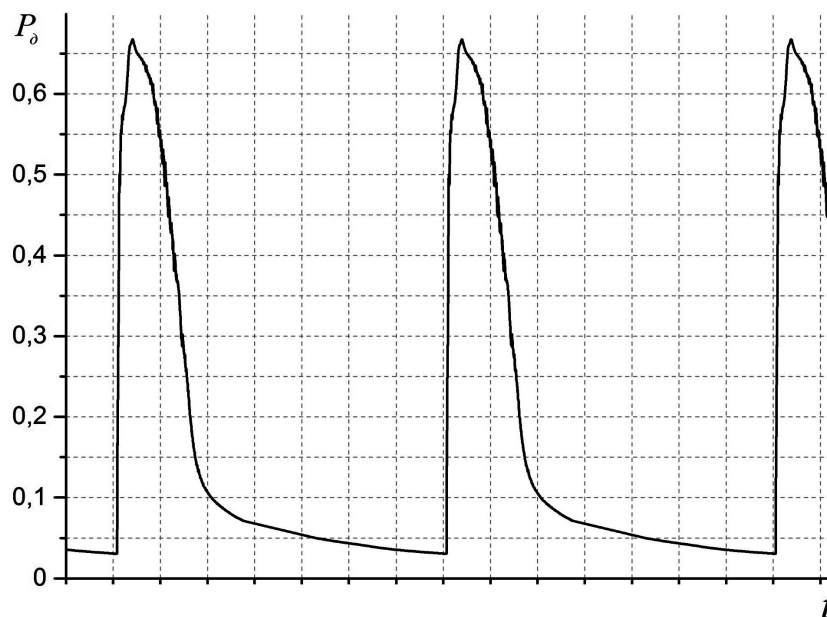


Рисунок 4 – Форма колебательного цикла. Модель k-ε Realizable. Полное давление $P_0 = 50$ ата

В форме колебательного цикла можно выделить верхний участок, отвечающий за момент открытой донной области, а сами колебания отнести к составным. Колебательный цикл, полученный в результате расчета с моделью Realizable k-ε ближе к характерному экспериментальному циклу.

Заключение

По результатам исследования можно сделать следующий вывод: обе рассматриваемые модели турбулентности пригодны для моделирования отрывного сверхзвукового течения в канале, но с определенными для каждой модели ограничениями.

Решение с моделью Realizable k - ϵ точнее воспроизводит течение на режимах, для которых наибольшее значение имеет воспроизведение внешней формы струи, т.е. её внешних границ и слоя смешения вблизи стенок канала, где ударно-волновая структура (УВС) не имеет значительного влияния, к таким можно отнести режим с открытой донной областью, когда газ из окружающей среды попадает в донную область, образуя мощное возвратное течение, режим составных низкочастотных колебаний. Большой размах колебаний можно объяснить завышением в расчете турбулентной вязкости, что приводит к большим перепадам давления на предельных участках цикла.

Решения с моделью Transition SST хуже согласуются с экспериментами на режимах с открытой донной областью, но на режимах, где УВС оказывает решающее значение, и взаимодействие струи с твердой стенкой определяется не слоем смешения, а взаимодействием скачков уплотнения с твердой стенкой, более точного совпадения качественных и количественных параметров можно добиться именно с Transition SST моделью. Например, целесообразнее использовать модель Transition SST на предельных режимах в момент перехода от неавтономного режима к автономному и на самом автономном режиме, где Realizable k - ϵ модель в силу все того же завышения турбулентной вязкости занижает значение давления в донной области, обеспечивая большее разрежение в ней. На нестационарных режимах модель Transition SST применима для воспроизведения псевдогармонических колебаний, так как в этом случае отсутствует режим открытой донной области с мощным возвратным течением.

Ни одна из рассмотренных моделей не может обеспечить достаточного согласования с экспериментом на всех возможных режимах течения, поэтому наиболее оптимальная методология исследования стационарных и квазистационарных сверхзвуковых течений должна содержать как модель Realizable k - ϵ , так и модель Transition SST.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (Соглашение № 14.575.21.0057, уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI57514X0057).

Литература:

1. Засухин О.Н. История экспериментальных исследований донного давления / О.Н. Засухин, П.В. Булат, Н.В. Продан // *Фундаментальные исследования*. – 2011. – № 12, Ч. 3. – 670–74 С. – URL : www.rae.ru/fs/?section=content&op=show_article&article_id=7981793
2. Старов А.В. Определение пределов устойчивого горения при высоких сверхзвуковых скоростях потока в канале / А.В. Старов // *Вестник НГУ. Серии: Физика*. – 2008. – Т. 3. – Выпуск 2. – С. 47–60.
3. Булат П.В. О низкочастотных расходных колебаниях донного давления / П.В. Булат, Н.В. Продан // *Фундаментальные исследования*. – 2013. – № 4–3. – С. 545–549.
4. Bulat M.P. Comparison of turbulence models in the calculation of supersonic separated flows / M.P. Bulat, P.V. Bulat // *World Applied Sciences Journal*. – 2013. – 27, 10 – 1263–66 P. – URL : [http://www.idosi.org/wasj/wasj27\(10\)13/4.pdf](http://www.idosi.org/wasj/wasj27(10)13/4.pdf) – DOI : 10.5829/idosi.wasj.2013.27.10.13715
5. Bulat P.V. Shock and detonation wave in terms of view of the theory of interaction gasdynamic discontinuities / P.V. Bulat, V.N. Uskov // *Life Science Journal*. – 2014. – 11, 8s. – 307–10 С. – URL : http://www.lifesciencesite.com/ljsj/life1108s/068_24921life1108s14_307_310.pdf
6. Bulat P.V. Gas-dynamic discontinuity conception / P.V. Bulat, V.N. Uskov, L.P. Arkhipova // *Research Journal of Applied Sciences*. – 2014. – 8, 22 – 2255–59 P. – URL : <http://www.maxwellsci.com/print/rjaset/v8-2255-2259.pdf>
7. Bulat P.V. Classification of gas-dynamic discontinuities and their interference problems / P.V. Bulat, V.N. Uskov, L.P. Arkhipova // *Research Journal of Applied Sciences*. – 2014. – 8, 22. – 2248–54 P. – URL : <http://maxwellsci.com/print/rjaset/v8-2248-2254.pdf>
8. Bulat P.V. Oblique shock wave reflection from the wall / P.V. Bulat, V.V. Upyrev, P.V. Denisenko // *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. – 2015. – V. 15. – № 2. – P. 338–345.
9. Bulat P.V. Mach reflection of a shock wave from the symmetry axis of the supersonic nonisobaric jet / P.V. Bulat, V.N. Uskov // *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*. – 2014. – 8, 1. – 135–42 P. – URL : <http://maxwellsci.com/print/rjaset/v8-135-142.pdf>
10. Волков К.Н. Течения и теплообмен в каналах и вращающихся полостях / К.Н. Волков, В.Н. Емельянов. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 488 с.

References:

1. Zasuhin O.N. History of experimental research base pressure / O.N. Zasuhin, P.V. Bulat, N.V. Prodan // Modern problems of science and education. – 2011. – № 12 (part 3). – P. 670–674. – URL : http://www.rae.ru/fs/?section=content&op=show_article&article_id=7981793
2. Starov A.V. Defining the limits of stable combustion at high supersonic flow velocities in the channel / A.V. Starov // Vestnik of NSU. Physics Series. – 2008. – № 2 (part 3). – P. 47–60.
3. Bulat P.V. On the low-frequency oscillations of expenditure base pressure / P.V. Bulat, N.V. Prodan // Modern problems of science and education. – 2013. – №4 (part 3). – P. 545–549. – URL : <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=31229>
4. Bulat M.P. Comparison of turbulence models in the calculation of supersonic separated flows / M.P. Bulat, P.V. Bulat // World Applied Sciences Journal. – 2013. – 27, 10 – 1263–66 P. – URL : [http://www.idosi.org/wasj/wasj27\(10\)13/4.pdf](http://www.idosi.org/wasj/wasj27(10)13/4.pdf) – DOI : 10.5829/idosi.wasj.2013.27.10.13715
5. Bulat P.V. Shock and detonation wave in terms of view of the theory of interaction gasdynamic discontinuities / P.V. Bulat, V.N. Uskov // Life Science Journal. – 2014. – 11, 8s. – 307–10 C. – URL : http://www.lifesciencesite.com/ljsj/life1108s/068_24921life1108s14_307_310.pdf
6. Bulat P.V. Gas-dynamic discontinuity conception / P.V. Bulat, V.N. Uskov, L.P. Arkhipova // Research Journal of Applied Sciences. – 2014. – 8, 22 – 2255–59 P. – URL : <http://www.maxwellsci.com/print/rjaset/v8-2255-2259.pdf>
7. Bulat P.V. Classification of gas-dynamic discontinuities and their interference problems / P.V. Bulat, V.N. Uskov, L.P. Arkhipova // Research Journal of Applied Sciences. – 2014. – 8, 22. – 2248–54 P. – URL : <http://maxwellsci.com/print/rjaset/v8-2248-2254.pdf>
8. Bulat P.V. Oblique shock wave reflection from the wall / P.V. Bulat, V.V. Upyrev, P.V. Denisenko // Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. – 2015. – V. 15. – № 2. – P. 338–345.
9. Bulat P.V. Mach reflection of a shock wave from the symmetry axis of the supersonic nonisobaric jet / P.V. Bulat, V.N. Uskov // Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. – 2014. – 8, 1. – 135–42 P. – URL : <http://maxwellsci.com/print/rjaset/v8-135-142.pdf>
10. Volkov K.N. Flows and Heat Transfer in Channels and Rotating Cavities / K.N. Volkov, V.N. Emelyanov. – M. : FIZMATLIT, 2010. – 488 p.