

УДК 533, 621.45.02

Экспериментальные исследования структуры перерасширенной сверхзвуковой струи

Пономарев А.А.*, Пономарев Н.Б., Кириллов Е.Б.*****

Исследовательский центр имени М.В. Келдыша,

ул. Онежская, 8, Москва, 125438, Россия

**e-mail: ponomar_aa@mail.ru*

***e-mail: ponomarevnb@mail.ru*

****e-mail: Kirillov_eb@mail.ru*

Аннотация

Работа посвящена экспериментальному изучению структуры струй, истекающих из сверхзвуковых осесимметричных сопел в режиме перерасширения. В статье показано, что по картине течения в струе, истекающей из сопла, можно судить об особенностях течения внутри сопла, в частности, о типе отрыва потока от стенок сопла. В работе с помощью прибора, работающего по методу Теплера, получены теневые картины течений в перерасширенных струях, истекающих из сверхзвуковых сопел. Были использованы два сопла, в которых в режиме перерасширения реализовывались различные виды отрыва потока («типичный» и «нетипичный»). Показано, что расположение скачков уплотнения и распределение вектора скорости потока в струях существенным образом зависит от того, какой тип отрывного течения реализовался в сопле.

Ключевые слова: сверхзвуковое сопло, отрывные течения, визуализация течения.

1. Введение

Жидкостные ракетные двигатели (ЖРД) верхних ступеней ракет-носителей работают в штатном режиме в определенном диапазоне высот, при этом давление окружающего воздуха там существенно ниже атмосферного давления у поверхности Земли. В связи с этим на этапе разработки контуры сопел данных ЖРД профилируются таким образом, чтобы обеспечить максимальный удельный импульс тяги при заданных массо-габаритных ограничениях именно в рабочем диапазоне высот полета и, следовательно, в определенном диапазоне давлений окружающей среды. Существующие в настоящее время методики профилирования контуров сопел ЖРД описаны в [1].

Все разрабатываемые или модернизируемые ЖРД, включая ЖРД верхних ступеней ракет-носителей, должны быть утвержденным образом испытаны. Естественно, испытания проходят в наземных условиях, т.е. с относительно высоким для высотных сопел внешним противодавлением.

Для понижения давления у среза испытуемого сопла большой степени расширения могут быть установлены специальные устройства, например, газодинамические трубы (ГДТ). В соответствии с существующей методикой профилирования ГДТ их длина составляет несколько (от 6 и выше) диаметров выходного сечения сопла. Ввиду того, что истекающие из сопла продукты сгорания обладают высокой температурой, стенки ГДТ должны охлаждаться. Кроме того, конструкция ГДТ сильно зависит от контура сопла испытуемого ЖРД и от состава и свойств продуктов сгорания, соответственно, каждая ГДТ является оптимальной для проведения испытаний определенного ЖРД и, вообще говоря, не может

применяться для испытаний других ЖРД. В связи с вышеизложенными сложностями часто испытания ЖРД с соплами большой степени расширения в некоторых случаях проводят без дополнительных средств понижения давления.

В такой ситуации сопло работает в режиме сильного перерасширения, что приводит к отрыву потока продуктов сгорания от стенок сопла. В литературе выделяют два вида отрывных течений: типичный (англ. free shock separation) [2-4] и нетипичный (англ. restricted shock separation) [5] отрыв потока. Данные виды течений в сопле существенно отличаются своей структурой. При типичном отрыве поток продуктов сгорания в некотором сечении сопла отрывается от стенок сопла и далее движется вблизи оси симметрии сопла. При этом в пристеночную отрывную зону проникает воздух из окружающей атмосферы. Характерной особенностью нетипичного отрыва является то, что поток продуктов сгорания, оторвавшись от стенки сопла, затем вновь присоединяется к ней и в дальнейшем продолжает двигаться вдоль стенки сопла с небольшой сверхзвуковой скоростью. В то же время вблизи оси симметрии сопла образуется зона медленных (дозвуковых) обратных токов. Подробно история изучения отрывных течений, их структура и некоторые свойства описаны в обзорной работе [6].

В работе [7] в модельных экспериментах показано, что амплитуда пульсаций давления у стенок сопла при нетипичном отрыве существенно (в несколько раз) выше, чем при типичном отрыве. Следовательно, в случае реализации нетипичного отрыва во время наземных испытаний ЖРД с соплами больших степеней расширения амплитуда вибраций сопел также будет на очень высоком уровне. В

работе [8] показано, что тепловой поток в стенку сопла при нетипичном отрыве потока достигает гораздо более высокого уровня, чем при типичном отрыве потока.

Таким образом, в случае реализации нетипичного отрыва потока при наземных испытаниях ЖРД верхних ступеней ракет-носителей сопла испытывают повышенные силовые и тепловые нагрузки, что может привести к разрушению ЖРД в процессе испытания. Соответственно, исследование характеристик данного явления с целью недопущения его возникновения при наземных испытаниях ЖРД обладает несомненной практической значимостью.

Соображения, изложенные в [9], указывают на то, что с увеличением степени расширения сопла вероятность реализации нетипичного отрыва потока в наземных испытаниях растет. При этом нужно заметить, что происходит постоянное увеличение степени расширения сопел ЖРД, разрабатываемых для верхних ступеней ракет-носителей и разгонных блоков. Данный факт свидетельствует о том, что исследования нетипичного отрыва являются в настоящий момент весьма актуальными.

Несмотря на то, что первое упоминание о нетипичном отрыве потока в зарубежной литературе [5] датировано 1973 годом, данное явление является все еще малоизученным, поскольку большинство работ по данной тематике являются расчетными, при этом ощущается явный недостаток достоверных экспериментальных данных. Фактически вплоть до настоящего времени не получен критерий, позволяющий определить вид отрыва на выбранном режиме работы конкретного ЖРД. В первом приближении можно утверждать, что вид отрыва потока продуктов сгорания зависит от свойств продуктов сгорания (в основном,

показателя адиабаты), контура сверхзвуковой части сопла и перепада давлений между камерой сгорания и средой, в которую происходит истечение продуктов сгорания. Также из некоторых косвенных данных следует, что перепад давлений, при котором происходит переход от одного вида отрыва к другому, может зависеть от всей предыстории выхода ЖРД на рабочий режим. Вышеуказанные особенности отрывных течений очень сильно затрудняют поиск достоверного критерия образования отрыва того или иного вида.

Кроме того, необходимо заметить, что структура отрывных течений в соплах исследовалась, в основном, расчетными методами. Редкие экспериментальные работы оперируют распределениями давлений вдоль стенок сопла, что недостаточно для точного описания структуры течения в случае отрыва потока. В связи с этим в настоящей работе основные усилия были направлены на то, чтобы визуализировать течение и непосредственно запечатлеть его ударно-волновую структуру.

2. Методика проведения экспериментальных исследований

Визуальное наблюдение в эксперименте за картиной течения газа в сопле является крайне сложной задачей. В связи с этим в настоящей работе исследуется структура истекающей из сопла струи. Для обоснования правомерности перехода от внутрисопловых процессов к струйным обратимся к свойствам отрывных течений. При достаточно высоком значении степени нерасчетности k ($k = p_H / p_a$, где p_H - давление в области, окружающей сопло, p_a - статическое давление у стенки в выходном сечении сопла при безотрывном течении) отрыв потока осуществляется внутри сопла. По мере уменьшения степени нерасчетности линия отрыва будет

смещаться в сторону выходного сечения сопла. В некоторый момент сопло запустится, т.е. стенки сопла будут обтекаться в безотрывном режиме, при этом, истекающая из сопла струя будет все еще перерасширенной. Как показывают эксперименты, положение ударных волн в истекающей струе в целом совпадает с аналогичной картиной при отрыве потока внутри сопла.

Структура истекающей из сопла струи была визуализирована с помощью прибора ИАБ-451, работающего по методу Теплера и позволяющего выделять в потоке неоднородности плотности газа. Несмотря на наглядность, сама по себе картина течения в струе не позволяет получить полную информацию об этом течении. В частности, оказывается невозможным определить направление вектора скорости в различных участках струи. Как уже упоминалось выше, ожидается, что в случае реализации нетипичного отрыва потока вблизи оси симметрии сопла сформируется область медленных возвратных токов. Следовательно, крайне важным оказывается определение направления течения газа в различных областях истекающей струи. Для решения данной проблемы перпендикулярно оси симметрии сопла натягивалась проволока, на которой были размещены «флажки» - небольшие элементы треугольной формы, изготовленные из тонкого металла. «Флажки» имеют возможность свободно, практически без трения, вращаться вокруг проволоки. Как показали предварительные исследования, такое устройство визуализации обладает достаточно высокой чувствительностью. «Флажки» устанавливаются по направлению вектора скорости набегающего потока при амплитуде скорости всего несколько метров в секунду, что вполне достаточно для определения направления вектора скорости в сверхзвуковой струе с отдельными областями дозвукового

течения. В данной работе были произведены вспомогательные исследования, которые показали, что проволока с «флажками» относительно небольшого размера сильно искажает течение в струе ниже по потоку. Следовательно, размещение двух и более таких элементов визуализации течения в ряд для получения пространственного распределения вектора скорости в струе приведет к неверным результатам. В связи с этим для исследования пространственной картины течения в струе проводилась серия экспериментов, в каждом из которых проволока с «флажками» размещалась на разных расстояниях от среза сопла.

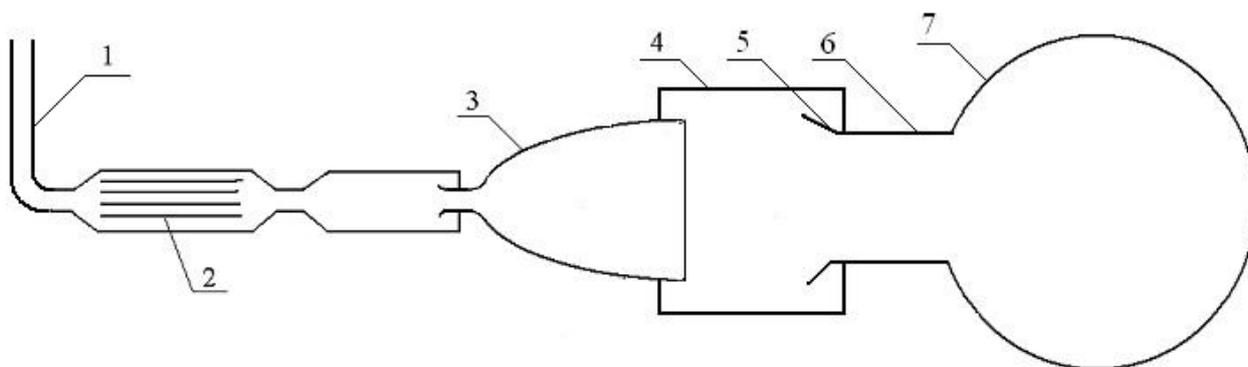


Рис.1. Схема стенда БМР ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша»:

1 – трубопровод воздуха высокого давления, 2 – электрический подогреватель, 3 – сверхзвуковое сопло, 4 – вакуумная камера, 5 – диффузор, 6 – вакуумный трубопровод, 7 – вакуумные баллоны.

Для проведения экспериментальных исследований картины течения газа в перерасширенной струе использовался стенд БМР («Большие числа Маха и Рейнольдса») ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша». Схема стенда изображена на рис. 1. На этом стенде в качестве рабочего тела используется воздух с полным давлением до 20 МПа. Барокамера стенда соединена с вакуумными баллонами, имеющими общий объем 2400 м³ и давление при вакуумировании до 1 кПа. Для предотвращения конденсации газов воздуха при расширении воздуха в сопле на

стенде предусмотрен предварительный электроподогрев этого воздуха. Электроподогреватели воздуха имеют мощность 240 кВт и представляют собой цилиндрические каналы с омываемыми сжатым воздухом металлическими спиралями, по которым пропускается электрический ток. Воздух, проходя по этим каналам, нагревается до температуры 320-450 К.

Как описано в [9], вид отрывного течения, реализующийся в исследуемом сопле, зависит от многих параметров, но сильнее всего от контура сопла и от показателя изоэнтропы рабочего тела. Следовательно, вполне логичным шагом в данном случае является использование двух разных сопел для получения и исследования типичного (сопло №1) и нетипичного (сопло №2) отрывов потока.

Сопло №1 имеет степень расширения $\varepsilon=20,8$ ($\varepsilon = F_a/F_*$, где F_a , F_* - соответственно площади выходного и минимального сечений сопла) при диаметре минимального сечения $d_*=25$ мм и длине расширяющейся части $L=160$ мм. Данное сопло спроектировано методом характеристик, показатель изоэнтропы рабочего тела был принят равным $n=1,4$. В результате в данном сопле геометрическое значение числа Маха в выходном сечении сопла по одномерной теории составило 4,77. Разница между числом Маха потока у стенки и на оси симметрии относительно невелика. Сопло №1 в данной работе используется для изучения картины течения при типичном отрыве потока.

Сопло №2 имеет степень расширения $\varepsilon=142,8$, при этом диаметр минимального сечения составляет $d_*=11,78$ мм, а длина расширяющейся части $L=207,4$ мм. Следует отметить, что данное сопло было спроектировано с

использованием метода характеристик в предположении, что рабочее тело будет иметь показатель изоэнтропы $n=1,3$ и число Маха в районе оси симметрии в выходном сечении сопла $M=7,15$. Использование в качестве рабочего тела сжатого воздуха с $n=1,4$ приводит к тому, что число Маха потока в выходном сечении сопла становится, во-первых, существенно выше по сравнению со случаем $n=1,3$, а, во-вторых, сильно неравномерно распределенным по сечению (от $M=6,5$ у стенки на внешней границе пограничного слоя до $M=10,8$ на оси симметрии). Сопло №2, как будет показано далее, является подходящим для получения и исследования нетипичного отрыва потока.

Исследование заключается в проведении ряда последовательных экспериментов. В каждом эксперименте полное давление рабочего тела, в качестве которого выступает подогретый воздух, поднималось последовательными шагами до заданной величины (от 2,5 до 4,5 МПа), при этом давление в барокамере стенда, которая связана с вакуумными баллонами, выдерживалось постоянным на протяжении всего запуска. Таким образом, нескольких экспериментов было достаточно, чтобы подробно исследовать картину течения в широком диапазоне по величине степени нерасчетности k и при разных положениях вышеописанного устройства визуализации.

В каждом эксперименте проводилась видеосъемка теневой картины истекающей струи, фиксируемой прибором ИАБ-451. Параллельно производился съем полного давления перед соплом и давления в барокамере. Погрешность измерения данных величин составила: 1) для полного давления - 1,5%; 2) для

давления в барокамере - 2%. Следовательно, погрешность определения отношения данных величин, а также степени нерасчетности составляет примерно 2,5%.

3. Результаты проведения экспериментальных исследований

Прежде всего, рассмотрим типичный отрыв потока в сопле №1 (см. рис. 2, 3). Здесь и далее выходное сечение сопла расположено у левого края изображения, а струя, соответственно, течет вправо.

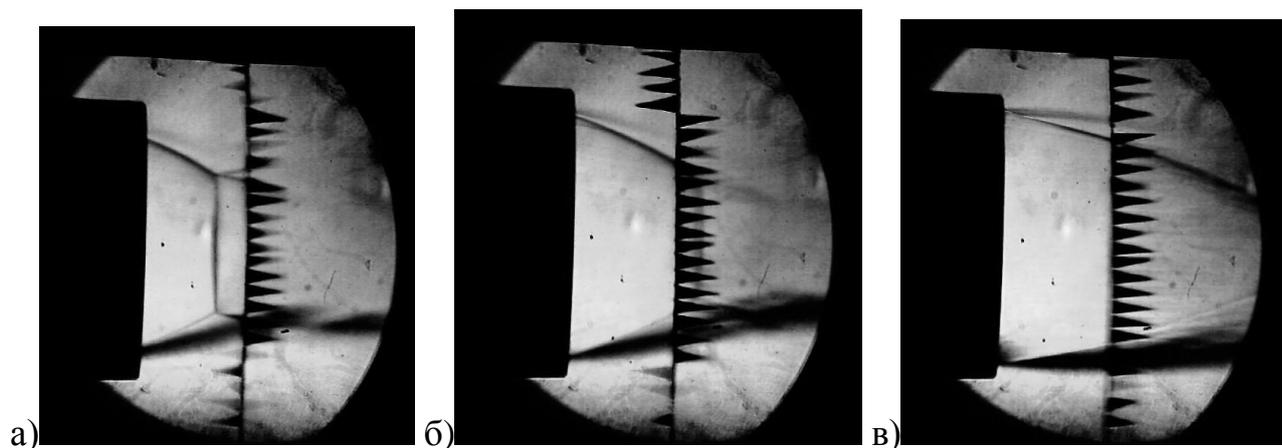


Рис. 2. Теневая картина течения струи (сопло №1) при различных значениях степени нерасчетности: а) $k=5,0$; б) $k=4,0$; в) $k=2,2$.

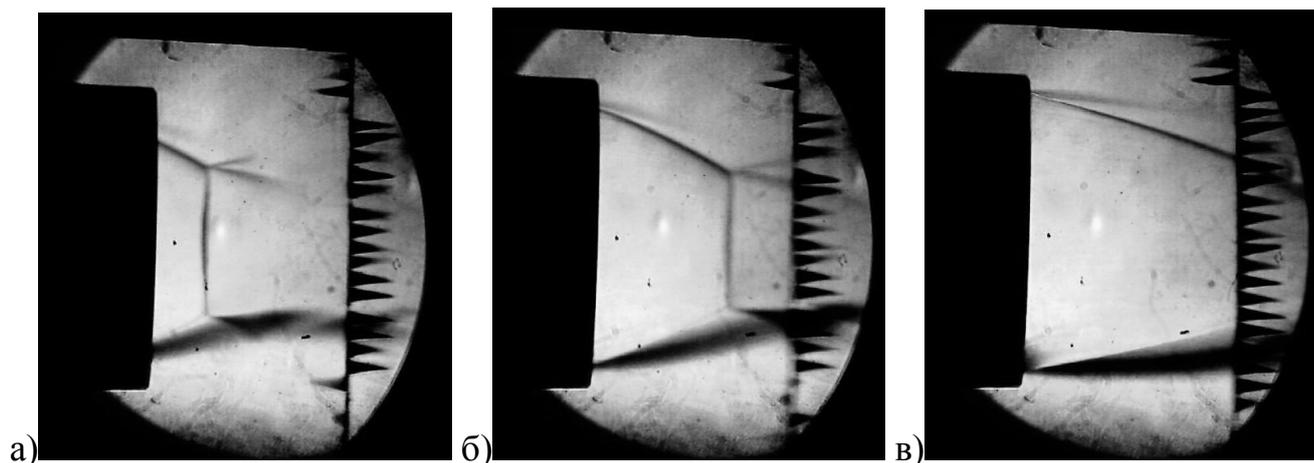


Рис. 3. Теневая картина течения струи (сопло №1) при различных значениях степени нерасчетности: а) $k=5,4$; б) $k=4,0$; в) $k=2,3$.

В различных точках струи вектор скорости, безусловно, имеет разное направление, однако проекция данного вектора на ось симметрии всегда направлена

вправо. Данный факт легко подтвердить тем, что «флажки», попадающие в струю, всегда направлены вправо. Кроме того, на фотографиях можно заметить области обратных токов, расположенные вокруг струи, истекающей из сопла. Так, например, на рис. 2б, 3а, 3б видно, что периферийные «флажки» направлены влево, т.е. в сторону среза сопла.

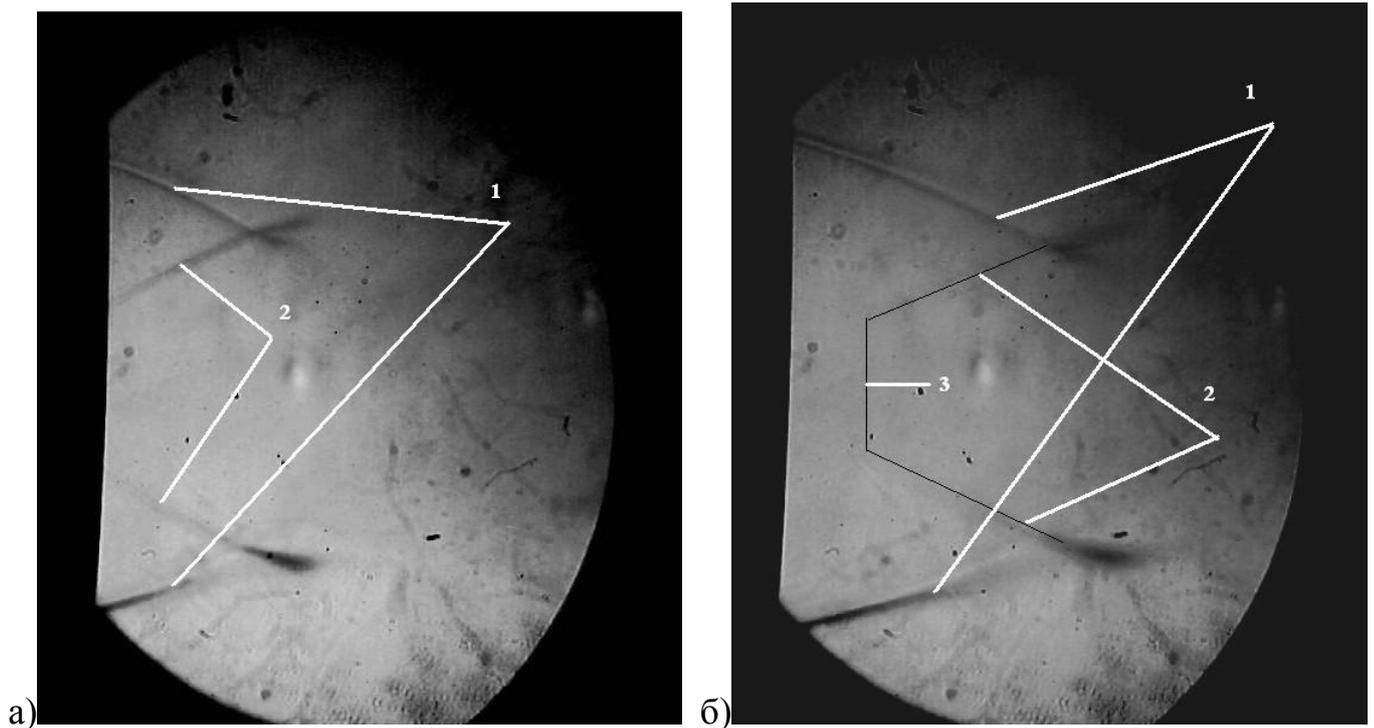


Рис. 4. Теневая картина течения струи (сопло №2) при различных значениях степени нерасчетности: а) $k=10,9$; б) $k=8,2$.

Перейдем к исследованию струи, истекающей из сопла №2 (см. рис. 4). Абсолютно очевидно, что данная картина не соответствует описанному выше типичному отрыву. Как видно на рис. 4, косые скачки 1 взаимодействуют с косыми скачками 2, которые в свою очередь соединяются прямым скачком уплотнения 3. Данная ударно-волновая структура возникает в случае реализации нетипичного отрыва потока и в зарубежной литературе получила название «ударная волна в форме шапки» (англ. cap shock) [10, 11].

В дальнейших экспериментах с устройством визуализации в виде проволоки с «флажками» можно определить направление вектора скорости потока в различных точках струи. По фотографии (рис. 5б) видно, что в приосевой области за прямым скачком уплотнения поток движется в сторону среза сопла, т.е. в направлении, противоположном тому, в котором движется основная часть струи. Очевидно, что данный возвратный поток не достигает выходного сечения сопла. Разворот происходит перед прямым скачком уплотнения.

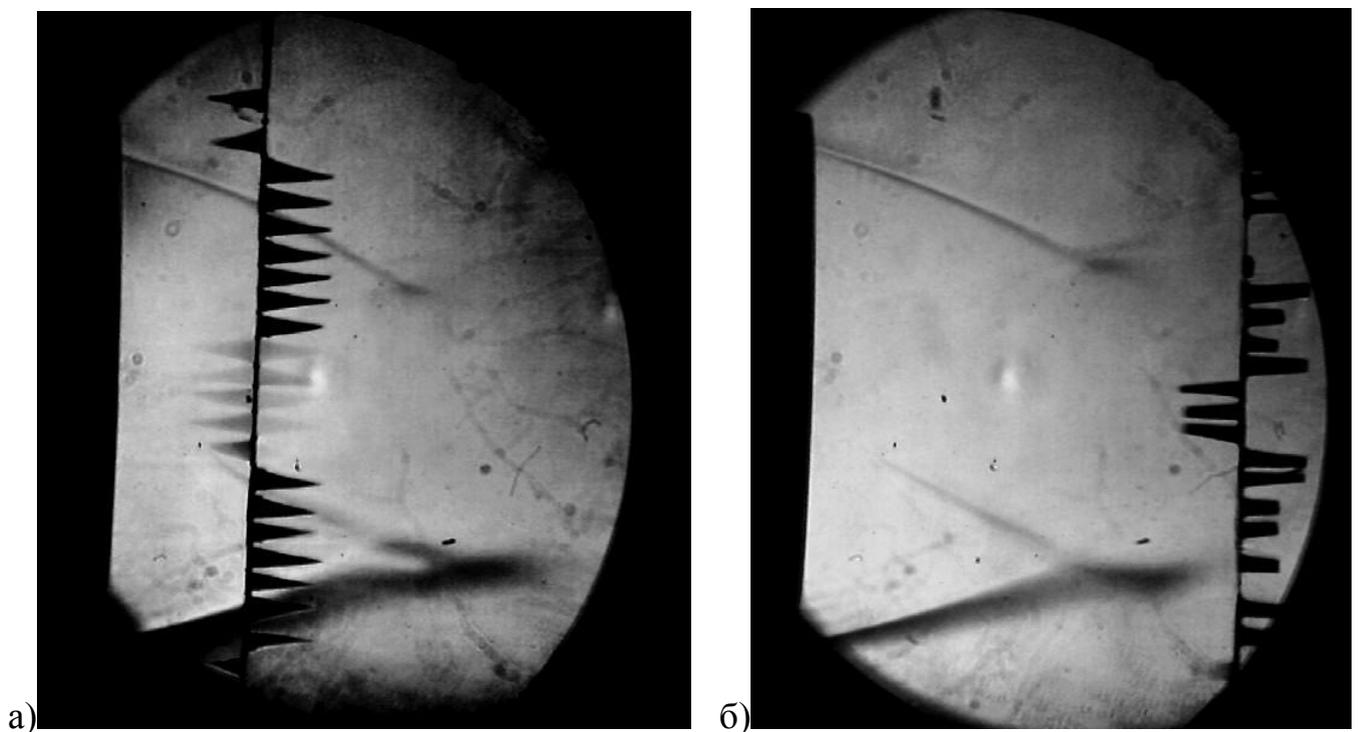


Рис. 5. Теневая картина течения струи (сопло №2) с установленным устройством визуализации вблизи (а) и вдали (б) от среза сопла при $k=5,9$.

На рис. 5а запечатлен момент времени, когда прямой скачок уплотнения располагается вблизи проволоки. Соответственно, рядом с центром проволоки поток движется справа налево, затем достигает прямого скачка уплотнения, разворачивается и далее движется в обратном направлении. Резкая смена направления движения в области устройства визуализации приводит к тому, что

«флажки» с высокой скоростью вращаются вокруг своей оси, и, вследствие этого, их изображение на фотографии размыто.

При уменьшении степени нерасчетности взаимодействующие друг с другом скачки уплотнения постепенно удаляется от среза сопла. При некотором значении степени нерасчетности осуществляется практически мгновенный переход от нетипичного отрыва к типичному. Картина течения, соответствующая типичному отрыву, показана на рис. 6 (закрывающий прямой скачок находится справа от области наблюдения и не виден на фотографии).

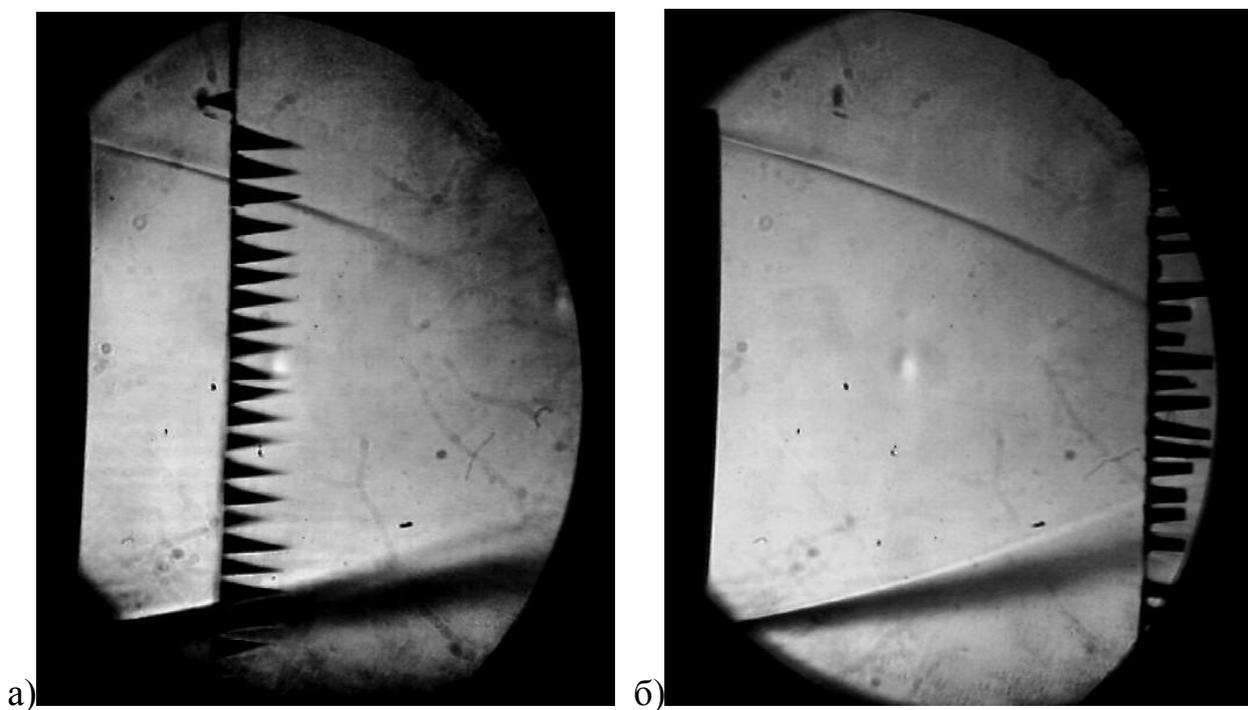


Рис. 6. Теневая картина течения струи (сопло №2) при различных значениях степени нерасчетности: а) $k=3,9$; б) $k=4,5$.

В данном случае проекция вектора скорости на ось симметрии в любой точке струи направлена вправо, а зоны обратного тока отсутствуют. Следует отметить, что переход в обратном направлении при увеличении степени нерасчетности газа также

возможен, но, как показано в [6], происходит при большем значении степени нерасчетности, чем прямой переход.

4. Заключение

В настоящей работе была визуализирована и исследована струя, истекающая из сверхзвукового осесимметричного сопла в режиме перерасширения. Показано, что в зависимости от конфигурации сопла и режима его работы возможно образование двух видов отрывного течения (типичного или нетипичного) в сопле. Структуры струй, истекающих из сопла в двух вышеуказанных случаях, существенно различаются. Нетипичный отрыв потока сопровождается образованием в приосевой области струи области возвратного дозвукового течения и «ударной волны в форме шапки». В условиях типичного отрыва подобных областей нет, а ударные волны формируют классический мостообразный скачок. При изменении степени нерасчетности возможен практически мгновенный переход от одного вида отрывного течения к другому.

Библиографический список

1. Рабочие процессы в жидкостном ракетном двигателе и их моделирование / Е.В. Лебединский, Г.П. Калмыков, С.В. Мосолов и др.; Под ред. академика РАН А.С. Коротеева. - М.: Машиностроение, 2008.
2. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. – М.: Наука; Гл. ред. физ.-мат. лит, 1969.
3. Shmucker R.H., Braitinger M.E. Ein vereinfachtes Verfahren zur Abschätzung der Leistungsgrenzen von Triebwerken für Kernstufen parallelgestufter Raketen und

einstufige Trager // Proceedings of 24th International Astronautical Congress, Baku, USSR, 1973.

4. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М.: Наука; Гл. ред. физ.-мат. лит, 1969.

5. Nave L.H. Sea Side Loads in High-Area-Ratio Rocket Engines // AIAA Paper 73-1284, 1973.

6. Пономарев А.А., Пономарев Н.Б. Об отрывных течениях в сверхзвуковых соплах // Вестник Московского авиационного института, 2011, т.18, №3, с. 55-64.

7. Комаров В.В, Пономарев А.А., Пономарев Н.Б. Экспериментальные исследования нетипичного отрыва потока газа в сопле с коническим насадком // Электронный журнал «Труды МАИ», 2010, №40. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=22868>.

8. Gross A. Experimental Investigations of Flow Restricted Shock Separation in High-Area-Ratio Nozzle with Exit Cone // AIAA Paper 2009-5145, 2009.

9. Пономарев А.А. Экспериментальные и расчетные исследования условий появления нетипичного отрыва потока в соплах и потерь удельного импульса тяги из-за неоднородностей состава продуктов сгорания. Диссертация на соиск. уч. ст. канд. физ.-мат. наук; защищена на заседании диссертационного совета Д212.125.14 при МАИ 18.11.2011, 149 с.

10. Nasuti F. Flow Structures and Separation in Overexpanded Rocket Nozzles // Proceedings of European Conference for Aerospace Sciences (EUCASS), Moscow, 2006.

11. Reijasse Ph. Flow Separation Regimes Induced by Cap-Shock in Overexpanded Optimized Propulsive Nozzles // Proceedings of European Conference for Aerospace Sciences (EUCASS), Moscow, 2006.