

УДК 629.784

Математическое моделирование аэродинамики столкновения ступеней ракеты-носителя

Горайнов Виктор Александрович^(*)

gorva797@mail.ru

РУТ (МИИТ), Москва, Россия

Аннотация. Представлены результаты моделирования разделения ступеней на двух примерах тандемно-пакетной компоновки ракет-носителей (РН). Выявлены критические аэрогазодинамические явления (приращение встречных сил на соседние ступени и аномальные пульсации давления), снижающие надежность разделения ступеней РН за счет струй, запускаемой ДУ 2-ой ступени для конкретных: траектории полета, геометрии межступенного отсека и режима разделения. Показано, что такие универсальные явления, как донное разрежение на верхней ступени и кратковременное аномальное сужение струи ДУ при её радиальном растекании на переднем днище нижней ступени могут приводить при определённой комбинации параметров к столкновению ступеней на этапе их разделения.

Ключевые слова: аэродинамика разделения РН, столкновение ступеней, нестационарная сверхзвуковая струя, межступенный отсек (МСО), пульсирующие режимы течения

Введение. Для большинства РН характерна тандемно-пакетная компоновка ([1]) и струйный способ разделения ступеней, когда струя, истекающая из сопла двигательной установки (ДУ) вышестоящей ступени воздействует на верхнее днище нижестоящей ступени и отталкивает отработавшую ступень. Вообще, струйные технологии занимают существенную нишу для широкого круга аэродинамических приложений [2]. Актуальность темы моделирования аэродинамики РН при разделении ее частей определяется серией, повторяющихся на более чем 30-летнем интервале, аварийных ситуаций с разделяющимися ступенями. Среди самых резонансных аварий можно назвать столкновения 1-ой и 2-ой ступеней РН «Союз»: 26.03.1986/11.10.2018 при разделении чисто пакетной компоновки и столкновение первой и второй ступеней корейской РН KSLV I/Naro в чисто тандемной компоновке в составе с 1-ой ступенью РН «Ангара» в период первых испытательных пусков (25.08.2009 г. и 10.06.2010). Последняя авария в значительной степени привела к отказу от струйного способа разделения ступеней при последующей эволюции самого проекта РН «Ангара» и, вообще, к отказу от компоновочной схемы этой РН первого поколения. Целью работы является выяснение возможных сочетаний аэрогазодинамических факторов (независимо от проблем сбоя автоматики и пр.), приводящих с высокой вероятностью к обозначенным авариям. Выявленные численным и экспериментальным моделированием эффекты разрежения и аномальных высокоамплитудных пульсаций давления в МСО до и в момент запуска ДУ верхней ступени составляют научную значимость и новизну результатов.

Материалы и методы; результаты. Оба аэрогазодинамических аспекта (разрежения и высокоамплитудных пульсаций давления в МСО) при тандемном и пакетном разделении ступеней рассматривались на примере компоновочной схемы РН «Ангара» первого поколения, показанной на рис. 1. и имеющей две пары баков окислителя в виде боковых блоков (ББ) и открытый МСО. Известно, что в заключениях комиссий Роскосмоса первопричиной аварий РН «Союз» названы дефекты механических элементов системы автоматики включения сопла движка увода ББ, а заключения российско-корейских комиссий (в частности, о взрыве ДУ 2-й ступени без указаний причины и с упором на то, что российская 1-я ступень отработала штатно) доведены до общественности не в полном объеме. Тем не менее, надо понимать, что фактическое столкновение ступеней происходит всегда под действием аэродинамических сил и как показано в настоящей работе возможен чисто аэродинамический сценарий (без каких-либо сопутствующих не аэродинамических причин, в т. ч., сбояв автоматики).

На базе математических моделей течения Эйлера, Навье-Стокса, схемы Годунова 2-го порядка и др. исследуется обтекание всего корпуса ракеты при квазистационарном изменении скорости набегающего потока ($M_\infty = 2 \div 9$) с множественным образованием скачков уплотнения (СУ) и отрывных зон (на ББ, у передней кромки МСО, перед СУ в самом МСО (рис. 1) и его окрестности), порождающие пульсации давления с длиной волны существенно меньшей временного масштаба изменения M_∞ .

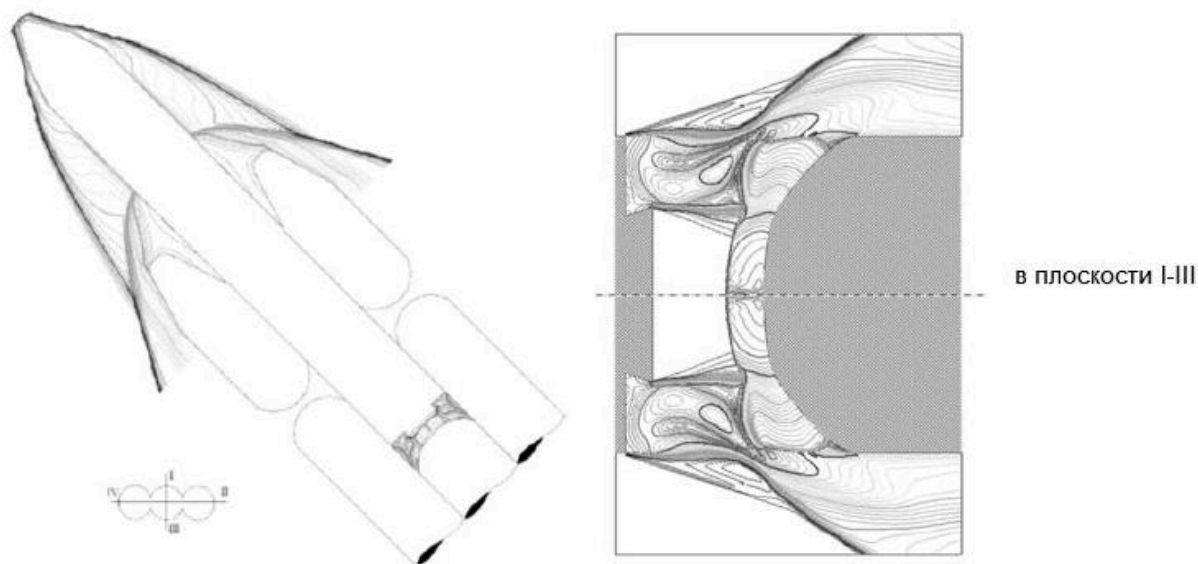


Рис. 1. Компоновка РН «Ангара» 1-го поколения и поле скоростей в МСО при запуске ДУ

В локальных зонах рассматривались модельные задачи для изучения пульсационных процессов без влияния течений в зонах выше по потоку с целью чистого вычислительного эксперимента. Так было установлено, что при

скорости полёта $M_\infty \sim 4.0$ в МСО возникают высокоамплитудные резонансные колебания для конкретных: траектории полета и геометрии МСО. Эффект инициируется процессами внутреннего возбуждения, вызванными отрывом пограничного слоя на СУ в самом МСО при квазистационарном внешнем течении ([3]). Проанализированы и другие выявленные внутренние и внешние по отношению к МСО источники возникновения пульсаций давления: отрыв выше по течению перед и за ББ, неустойчивые возвратные зоны за тройной конфигурацией СУ в свободной ([4]) и взаимодействующей с поперечной преградой сверхзвуковой струе (по пионерским результатам ЦНИИмаш [5] и школы Военмеха Гинзбурга И.П.). Так с помощью визуализации обтекания поверхности связки центрального цилиндра с моделями двух симметричных ББ в аэродинамической трубе ($M_\infty = 4$ и единичным Рейнольдсом $\sim 10^7$) установлены линии отрыва и криволинейные линии стекания и растекания, точки торможения и геометрия проекции отрывных зон на стенках. Структура СУ в поперечном сечении на той же модели определена по тэплеровской картине [3]. Пульсирующие режимы течения в МСО обнаружены и под влиянием нестационарного истечения сверхзвуковой струи ДУ верхней ступени при $M_\infty \approx 7$ при том, что до запуска ДУ на этом отрезке траектории полёта пульсаций нет.

В физическом эксперименте при моделировании радиального растекания струи на стенке перпендикулярной к оси центральной осесимметричной струи выявлена аномальная зона разрежения в окрестности места наибольшего сужения радиальной струи ([6]). При этом интеграл от разности давления на верхнем (обтекаемом) и нижнем торцах диска (или цилиндра) может давать силу, действующую на обтекаемый диск, направленную навстречу струе. В условиях запуска ДУ верхней ступени этот эффект означает перманентное приращение силы, действующей на ЦБ нижней ступени в сторону верхней ступени. В тот же временной отрезок при запуске ДУ верхней ступени в силу эжекции струи появляется эффект донного разрежения (печально знаменитый со времён проекта суперракеты «Н1»), который для верхней ступени даёт приращение силы в направлении нижней ступени. Анализ показал, что кратковременное проявление названных эффектов может приводить к столкновению ступеней для типовой тандемной компоновки, как у корейской РН KSLV-I/Naro.

Заключение. При тандемно-пакетной компоновке РН такие универсальные эффекты, как донное разрежение на верхней ступени и аномальное сужение струи ДУ при её радиальном растекании на переднем днище нижней ступени могут приводить при некоторой комбинации параметров к столкновению ступеней на этапе их разделения. При том, что струйный способ разделения ступеней в полной мере имеет право на существование, выявленные эффекты должны учитываться при проектировании новых РН со струйной технологией разделения ([1]), включая перспективную РН «Союз-5» с открытым МСО, как в рассмотренной схеме.

Список источников

- [1] Афанасьев И. Локомотивы нового поколения. *Русский космос*, 2020, № 15, с. 34–39.
- [2] Горяйнов В.А., Моделирование струйного торможения рельсового стенда для аэродинамических испытаний крупномасштабных макетов сверхзвуковых пассажирских самолетов. *Труды МАИ*, 2025, № 141. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=184498> (дата обращения 15.11.2025).
- [3] Горяйнов В.А. Недиссипативные механизмы возбуждения автоколебаний в потоках с лямбда-конфигурацией ударных волн. *Известия высших учебных заведений. Физика*, 2004, т. 47, № 10, с. 47–60.
- [4] Горяйнов В.А. О возможности эффекта реверса течения в свободных сверхзвуковых струях. *Математическое моделирование*, 2003, т. 15, № 7, с. 86–92.
- [5] Губанова О.Г., Лунев В.В., Пластинина Л.Н. О центральной срывной зоне при взаимодействии сверхзвуковой недорасширенной струи с преградой. *Механика жидкости и газа*, 1971, № 2, с. 135–138.
- [6] Горяйнов В.А. Возникновение пульсационных режимов в газовых струях при постоянном расходе. *Нелинейные задачи теории гидро-динамической устойчивости и турбулентность. XXV Междунар. конф.: матер.* Москва, Изд-во МГУ им. М.В. Ломоносова, 2024, с. 68–88.