



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования**

**«Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова»
(БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова)**

Россия, Санкт-Петербург, 190005, 1-я Красноармейская ул., д.1. Тел.: (812) 316-2394, факс: (812) 490-0591,
e-mail: komdep@bstu.spb.su, www.voenmeh.ru
ИНН 7809003047

10.06.2021 № 3/6

На № _____ от _____

«Утверждаю»

Директор по научной работе
и инновационному развитию

Матвеев

0» июня 2021 г.

Отзыв ведущей организации

БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д.Ф. Устинова

на диссертационную работу **Кисловского Валентина Алексеевича «Изменение сил на поверхности осесимметричного тела конечного размера в сверхзвуковом потоке при выдуве поперечной газовой струи»**, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

Диссертационная работа В.А. Кисловского посвящена исследованию возможности газоструйного управления аэродинамическими характеристиками осесимметричного летательного аппарата (ЛА) в сверхзвуковом потоке при поперечном вдуве газовой струи с боковой поверхности. В работе рассматривается влияние струи на картину течения вблизи места вдува, на перераспределение давления по поверхности ЛА, на изменение аэродинамических сил и моментов и на параметры полётной траектории.

Газоструйный способ управления аэродинамическими характеристиками тел является альтернативой традиционному использованию отклоняемых аэродинамических поверхностей – механических рулей, интерцепторов и т.п. Этот спо-

соб имеет ряд известных преимуществ, которые заключаются в отсутствии сложной системы механических приводов, более высокой надёжности, отсутствии влияния на аэродинамическую силу сопротивления ЛА при отсутствии вдува и слабом влиянии при вдуве, в широком диапазоне управляющих воздействий и высокой скорости срабатывания. Взаимодействие поперечно вдуваемой струи с потоком, обтекающим поверхность, как фундаментальная задача газовой динамики исследуется уже около 70 лет. В последние два десятилетия наблюдается ренессанс интереса к этой задаче в связи с применением вдува струи с поверхности ЛА как способа управления его движением и повышения маневренности, однако этот способ получил пока ограниченное распространение. С прикладной точки зрения возникла новая задача об определении управляющего воздействия на ЛА при поперечном вдуве струи с боковой поверхности во время крейсерского полета и совершения маневров. Управляющее воздействие, очевидно, зависит как от реактивной силы вдуваемой струи, так и от перераспределения напряжений (в том числе давления) по поверхности всего ЛА. Последний эффект до последнего времени не был исследован в должной степени, и вопрос о влиянии вдува струи на аэродинамические характеристики ЛА с учетом изменения сил на поверхности ЛА оставался открытым. В этой связи **тема диссертации, сформулированная цель и поставленные задачи являются актуальными.**

Научная ценность

- С помощью численного моделирования исследовано влияние поперечного вдува струи при сверхзвуковом обтекании ЛА на силу сопротивления, возникающие поперечную силу и аэродинамический момент с учетом перераспределения давления на поверхности ЛА. Получены численные оценки подтверждены автором экспериментально. Показано, что перераспределение давления дает существенный вклад в изменение аэродинамических характеристик ЛА и особенно сильно влияет на поперечную силу и момент. Данный результат является наиболее важным и фундаментальным. Он даёт основание концептуально пересмотреть методы расчета аэродинамических характеристик ЛА с поперечным вдувом управляющей струи, в которых учитывается только реактивная сила струи и не учитывается изменение поля течения и перераспределение давления по корпусу ЛА.
- Более частными, но также представляющим научную ценность, являются конкретные результаты параметрического исследования влияния на аэродинамические характеристики ЛА различных факторов (относительного размера и положения выходного отверстия, степени нерасчётности струи, поперечной

кривизны корпуса ЛА и др.). Найдено, что увеличение диаметра отверстия увеличивает эффект кривизны поверхности. Обнаружен диапазон изменения отношения диаметра отверстия к диаметру корпуса ЛА, в котором поперечная сила практически не изменяется. Получены оценки влияния вдува струи на изменение аэродинамических характеристик хвостового стабилизатора.

- На основе уравнений динамики полета разработан алгоритм и выполнены траекторные расчеты ЛА осесимметричной конфигурации с учетом управляющего воздействия поперечной газовой струи и перераспределения давления по поверхности ЛА. Найдено, что непринятие во внимание перераспределения давления при кратковременном (5 секунд) воздействии поперечной управляющей газовой струи на динамику движения ЛА может приводить к значительной ошибке в определении конечной точки траектории полёта (для рассмотренного варианта ЛА ошибка составила более 10 % при баллистическом спуске с начальной высоты 5 км и скорости 1200 м/с).

Практическая значимость

Полученные в диссертации результаты могут быть использованы для развития новых систем газоструйного управления ЛА и корректировки их траектории полета. Рассмотренная в диссертации задача управления аэродинамическими характеристиками ЛА относится к приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники РФ (п. 7 «Транспортные, авиационные и космические системы) и к разработке критических технологий (п. 24. «Технологии создания ракетно-космической и транспортной техники нового поколения»). Результаты диссертационного исследования могут представить интерес для организаций, занимающихся исследованиями и разработками новых образцов летательной техники: НПО «Машиностроение», ЦАГИ, ИТПМ СО РАН, БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова и другие.

По диссертации следует сделать ряд **замечаний**.

1. Не описана с достаточной полнотой математическая постановка задачи о возмущенном течении газа при вдуве струи с поверхности в сверхзвуковой поток. Не приведена замкнутая система уравнений Рейнольдса вместе с замыкающими уравнениями и соотношениями для принятой модели турбулентности, включая расшифровку всех слагаемых в уравнениях (2.5) и (2.6), поправку Уилкокса и др. Не указаны все граничные условия, в частности, на входной границе не указаны

принятые значения кинетической энергии турбулентности и скорости диссипации. Ссылка на то, что численная модель рассматриваемого течения хорошо известна, недостаточна. В диссертации следовало дать строгое и полное описание математической постановки задачи.

2. Не описана с достаточной подробностью использованная сетка в расчетной области. Автор пишет, что сетка сгущалась в области пограничных слоев, но в данной задаче областями с большими градиентами являются также границы возникающих вихревых образований и области смещения струи и основного потока. Об этих особенностях при построении сетки в работе ничего не сказано.

3. Хотя одна из заявленных целей исследования состояла в «изучении физической картины течения при взаимодействии набегающего сверхзвукового потока с выдуваемой поперечной газовой струей» (стр. 6), эта цель была достигнута лишь частично. Имя достаточно мощный инструмент численного моделирования ANSYS Fluent, можно было бы тщательно исследовать сложную трехмерную структуру течения в области вдува и в следе за ней. В работе приведено распределение числа Маха (рис. 2.7, 2.19, 2,34) в плоскости симметрии и изолинии плотности в нескольких поперечных сечениях потока (рис. 2.20). В то же время, в рассматриваемой задаче значительно более информативным является вихревая структура возмущенного течения, которую можно было бы сравнить хотя бы качественно со схемами течения на рисунках 1.6, 1.8, 1.9 и 1.10. Рисунок здесь 2.4, на котором «отображены области интенсивного изменения градиента скорости», к сожалению, мало что проясняет. Детальное исследование вихревой структуры и полей скорости с указанием направления течения позволило бы прояснить важные особенности течения, влияющие в том числе и на распределение давления, и избежать общих рассуждений о том, что изменение подъемной силы «связано с взаимодействием подковообразного вихря с дополнительными аэродинамическими поверхностями». Интересно было бы получить в эксперименте картины растекания газа по поверхности в области вдува струи («техника» использования саже-маслянного покрытия хорошо известна) и привести сравнение расчетных и экспериментальных данных аналогично тому, как это показано на заимствованном из литературы рисунке 1.15.

4. Во всех расчетах и в эксперименте угол атаки ЛА был принят равным нулю. Это снижает возможность выявления важных особенностей обтекания ЛА при вдуве струи. При реальном полёте ЛА всегда имеет некоторый отличный от нуля угол атаки. В этом случае обтекание ЛА даже без вдува струи является трех-

мерным и достаточно сложным. Как показывают последние исследования, обтекание под ненулевым углом атаки может стать при некоторых условиях нестационарным. Хотелось бы видеть в диссертации результаты моделирования течения и для случая ненулевого угла атаки и анализ возникающих при этом особенностей течения и силовых нагрузок на ЛА.

5. Так же неполно, как и модель течения, описаны уравнения движения ЛА (стр. 83) в главе 3. Отсутствуют уравнения, описывающие вращательное движение ЛА, хотя в алгоритме изменения компонент угловой скорости ЛА вычисляются. В исходной системе уравнений не описаны X , Y и Z ни в тексте, ни в Списке обозначений. Говорится, что таблица с аэродинамическими характеристиками ЛА загружается в программу в качестве исходных данных. В алгоритме расчета фигурируют угол атаки и угол рыскания. Здесь возникает вопрос, откуда берутся в этом случае указанные характеристики. Если автор действительно решал задачу о вдуве струи при ненулевом угле атаки ЛА, то эти данные следовало привести в Главе 2. Если нет, то вопрос об адекватности загружаемых характеристик остается открытым и требует пояснения.

По диссертации можно сделать также замечания технического характера: в тексте большое число неудачных выражений и опечаток. В Списке литературы некоторые одни и те же источники приводятся дважды под разными номерами (например, [2] и [19], [8] и [45], [11] и [38]), отсутствует название издательства (например, [37]), неточные названия журналов и изданий (например, [8], [40]), не всегда указаны полные выходные данные статей.

Сделанные замечания не влияют на общую положительную оценку работы. Диссертация вполне удовлетворяет п. 9 Положения о присуждении ученых степеней от 24 сентября 2013 года, № 842, утвержденного постановлением Правительства РФ, с последующими изменениями. Она является научно-квалификационной работой, в которой в полной постановке решена задача о влиянии вдуваемой поперечной звуковой струи с боковой поверхности ЛА осесимметричной конфигурации на изменение его аэродинамических характеристик при сверхзвуковой скорости обтекания. Исследовано возмущенное течение, вызываемое вдувом струи и перераспределение давления по всей поверхности ЛА. Показано, что силы и моменты, возникающие вследствие перераспределения давления могут быть существенными, и их учет может приводить к заметному изменению траектории полёта ЛА. Полученные результаты являются новыми. Они имеют важное значение

для аэродинамического проектирования ЛА с газоструйными системами управления.

Как квалификационная работа диссертация соответствует пп. 3, 4, 9 и 12 паспорта специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Подробный доклад автора по завершенной диссертации был представлен и обсужден на научном семинаре кафедры «Плазмогазодинамика и теплотехника» и получил одобрение. Отзыв был обсужден на заседании кафедры (протокол № 5 от 3 июня 2021 г.).

Ввиду изложенного считаем, что автор диссертации Кисловский Валентин Алексеевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

И.о. зав. кафедрой
«Плазмогазодинамика и теплотехника»
кандидат технических наук

И.В. Тетерина

Научный руководитель семинара
по механике жидкости, газа и плазмы
доктор физико-математических наук, пр
профессор кафедры «Плазмогазодинамика
и теплотехника»

Ю.М. Циркунов

Тетерина Ирина Владимировна, E-mail: teterina_iv@voenmeh.ru

Циркунов Юрий Михайлович, E-mail: tsirkunov_ium@voenmeh.ru

Сведения о ведущей организации по диссертации
Кисловского Валентина Алексеевича
**"Изменение сил на поверхности осесимметричного тела конечного размера в
сверхзвуковом потоке при выдуве поперечной газовой струи"** по специальности
01.02.05 — Механика жидкости, газа и плазмы
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Полное наименование организации в соответствии с уставом:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»
Сокращенное наименование организации в соответствии с уставом:	БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова
Ведомственная принадлежность организации	Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Полное наименование структурного подразделения, составляющего отзыв:	Кафедра «Плазмогазодинамика и теплотехника» факультета Ракетно-космической техники
Почтовый адрес организации:	г. Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д.1, 190005, Россия
Веб-сайт	https://www.voenmeh.ru/
Телефон	8 (812) 316-23-94
Адрес электронной почты	komdep@bstu.spb.su

Список основных публикаций работников структурного подразделения, составляющего отзыв, в рецензируемых научных изданиях за последние пять лет по теме диссертации (не более 15 публикаций).

№	Авторы	Название	Издательство, журнал, год, №, страницы	Вид, год
1	Волков К.Н., Емельянов В.Н., Яковчук М.С.	Оптимизация органов управления вектором тяги, основанных на вдуве струи газа в сверхзвуковую часть сопла	XXV всероссийский семинар с международным участием по струйным, отрывным и нестационарным течениям. 2018. С. 62-63	Тезисы доклада на конференции, 2018
2	Волков К.Н., Емельянов В.Н., Яковчук М.С.	Поперечный вдув струи с поверхности плоской пластины в сверхзвуковой поток	Инженерно-физический журнал. 2017. Т.90, №6 С. 1512-1517	Статья, 2017

3	Emelyanov V.N., Pustovalov A.V., Volkov K.N.	Supersonic jet and nozzle flows in uniform-flow and free-vortex aerodynamic windows of gas lasers	АСТА АSTRONAUTICA. 2019. Т.156	Статья, 2019
4	Волков К.Н., Емельянов В.Н., Яковчук М.С	Структура течения и изменение тяги при вдуве струи газа в сверхзвуковую часть сопла	Журнал технической физики. 2019. Т.89, №3 С. 353-359	Статья, 2019
5	Волков К.Н., Емельянов В.Н., Яковчук М.С	Многопараметрическая оптимизация органов управления вектором тяги, основанных на вдуве струи газа в сверхзвуковую часть сопла	Вычислительные методы и программирование. 2018. Т. 19, №2 С. 158-172	Статья, 2018
6	Волков К.Н., Емельянов В.Н., Яковчук М.С	Моделирование поперечного вдува импульсной струи с поверхности плоской пластины в сверхзвуковой поток	Прикладная механика и техническая физика. 2017. Т. 58, № 6(346) С. 114-125	Статья, 2017
7	Волков К.Н., Емельянов В.Н., Тетерина И.В., Яковчук М.С.	Визуализация вихревых течений в вычислительной газовой динамике	Журнал вычислительной математики и математической физики. 2017. Т. 57, № 8 С. 1374-1391	Статья, 2017

Ректор
БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, д.т.н.

М. Иванов
2021