

УДК 629.1, 629.7, 623.74

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ДОННОГО ДАВЛЕНИЯ

¹Засухин О.Н., ²Булат П.В., ³Продан Н.В.

¹Балтийский государственный технический университет им. Д.Ф.Устинова;

²ООО «ВНХ-Проект» НОЦ «Механика», Санкт-Петербург, e-mail: kolinti@mail.ru

Статья посвящена изложению полуэмпирических и интегральных методов расчета давления в донной области летательного аппарата на стационарных режимах. Показана историческая ретроспектива совершенствования методик расчета и математических моделей. Рассмотрена постановка задачи расчета донного давления. Сформулировано полное множество газодинамических переменных, которые при заданной геометрии установки полностью определяют картину течения в донной области. Рассмотрены различные варианты методов расчета донного давления, основанные на концепции разделительной линии тока. Приведены сведения о работах в области создания более универсальных интегральных методов расчета.

Ключевые слова: донное давление, разделительная линия тока, интегральные методы

DEVELOPMENT OF METHODS BASE PRESSURE

¹Zasukhin O.N., ²Bulat P.V., ³Prodan N.V.

¹Baltiysky State Technical University of Ustinov;

²«VNH-Project» Ltd SEC «Mechanics», St. Petersburg, e-mail: kolinti@mail.ru

Shows the historical perspective of improving design procedures and mathematical models. We consider the formulation of the problem of calculating the base pressure. Formulated a complete set of gas-dynamic variables for a given geometry of the setup, completely determine the flow pattern in the base region. We consider different methods of calculation of bottom pressure based on the concept of dividing streamline. The information about the works of a more universal integral methods of calculation.

Keywords: base pressure, the dividing streamline, integral methods

Донное сопротивление летательного аппарата на сверхзвуковых скоростях может составлять до 40% общего сопротивления. Необходимо уметь рассчитывать донное давление для того, чтобы находить способы снижения донного сопротивления. В других технических устройствах, например, эжекторах, стендах имитации высотных условий, наоборот, ставится задача уменьшения донного давления.

Постановка задачи расчета донного давления

В отрывных течениях с внезапным расширением (ТВР) всегда можно выделить

донную область, в которой из-за эжектирующего действия струи (или внешнего сверхзвукового течения) характерное давление ниже, чем в окружающей среде или основном (спутном) потоке. Вихревое течение в этой области существенно дозвуковое. Основными геометрическими параметрами f_G , от которых зависит характер течения с внезапным расширением, являются (рис. 1): радиусы критического (R_*), выходного внутреннего (R_a) и наружного (R_c) сечения сопла, угол (θ_a) полураствора сопла на его срезе, а также радиус канала (R_k).

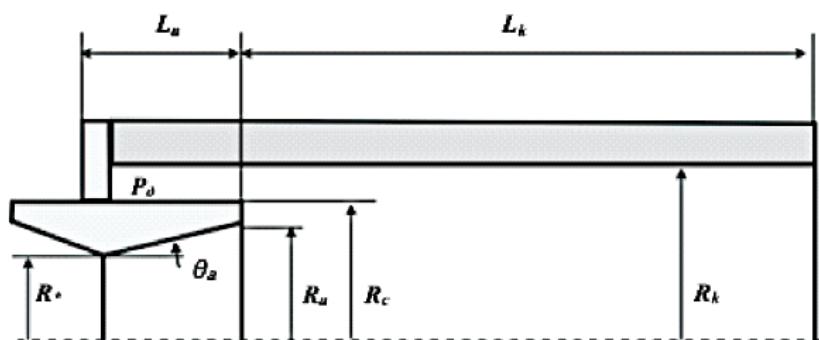


Рис. 1. Геометрия канала с внезапным расширением:

R_* – радиус критического сечения сопла; R_a – радиус выходного внутреннего сечения сопла;

R_c – радиус выходного наружного сечения сопла; θ_a – угол полураствора сопла на его срезе;

R_k – радиус канала; L_k – длина канала; L_a – длина выноса сопла в канал

Удобно использовать безразмерные величины: L_k – безразмерная длина канала (часто вместо индекса «к» используется индекс «тр», т.е. обозначение L_k равнозначно $L_{тр}$), $F_{тр}/F_*$ – площадь канала, отнесенная к площади критического сечения сопла, M_a – геометрическое число Маха сопла. Положение сопла в канале определяют длина L_a выноса сопла в канал, влияющая на объем донной области, а также длина L_k канала.

При заданной геометрии сопла и канала течение полностью определяется множествами газодинамических переменных f_0 параметров торможения рабочего газа, истекающего из сопла, и f_n – газа, заполняющего канал до начала истечения струи. Множества $f_{0,n}$ составляют термодинамические и теплофизические переменные f , определяющие состояние рабочего и окружающего газа: p – давление, T – температура, $\gamma = C_p/C_v$ – показатель адиабаты и другие, которые влияют на донное давление (P_d) в окрестности выходного сечения сопла Лавала. Отношение статических давлений рабочего газа на внутренней кромке сопла и в донной области ($n_a = P_a/P_d$) определяет локальную нерасчетность истечения струи из сопла в отличие от величины $n = P_a/P_n$, которая обычно используется в качестве основного параметра, характеризующего истечение струи из сопла Лавала в окружающее пространство. Ставится задача при заданных условиях f_n в окружающей среде найти значение среднего давления в донной области.

Становление методов расчета донного давления

Отдельные результаты исследований по условиям реализации сверхзвукового режима течения в каналах содержатся в работах Гусева В.К. [14], Гетерта [6], в статьях Давидсона В.Е., Чухало Н.А. [31], Ойкни-нэ и Фортаниера [47], Венедикта [5], Кана [43], но использование их для практических расчетов в широком диапазоне определяющих параметров затруднительно.

Шишков А.А. в работе [32] предлагает определять давление, при котором в выхлопном диффузоре высотного стенда устанавливается сверхзвуковое течение, по одномерной теории в предположении, что скорость в нем изменяется от сверхзвуковой до дозвуковой, а коэффициент восстановления полного давления такой же, как и в прямом скачке. Для улучшения совпадения расчетных и экспериментальных данных в работе [32] вводится согласующий коэффициент, учитывающий отклонение реального процесса от расчетной одномерной модели течения идеального газа. При

больших величинах отношения диаметра диффузора к диаметру выходного сечения сопла расчеты по одномерной теории не дают удовлетворительных результатов.

Практически все исследователи течения струи в каналах с внезапным расширением, проводя визуализационные исследования волновой структуры, производили измерения распределения давления вдоль образующей канала. Такие измерения присутствуют, как уже отмечалось, в первых работах Фабри и Систрунка [40], затем это направление было продолжено в работах Андерсона и Вильямса [36], Дэвидсона В.Е. и Нешерета П.А. [15], Батсона и Бертина [37, 38], Глотова Г.Ф. и Мороза З.К. [7], Беспалова А.М., Михальченко А.Г. и Серебрякова В.Г. [1]. Во всех этих работах отмечается периодичность возрастания распределения статического давления по стенке канала, соответствующая периодичности повторения зон отражения скачков уплотнения Х-образной структуры от стенки канала на режиме устойчивого сверхзвукового течения газа по каналу.

В работе [15] по результатам экспериментальных исследований предложен эмпирический способ определения как минимальных значений давления на стенке, так и максимальных пиковых значений в зонах падения скачков уплотнения.

В работе [1], помимо донного давления и распределения давления по стенке канала, экспериментально определялось и полное давление по оси канала с помощью приемника полного давления. Эти исследования с промерами полей распределения параметров по сечениям канала на устойчивом сверхзвуковом режиме были продолжены в работах Давидсона В.Е. и Нешерета П.А. [25] при наружном атмосферном давлении на срезе канала, а при пониженном – в работах Лейтеса Е.А., Нестерова Ю.Н., Хомутова В.А. [24], Андерсона и Мейера [35].

Однако одной из важнейших задач при исследовании отрывного турбулентного течения остается определение давления в самой застойной зоне – донного давления.

В работе [27] рассмотрены методы расчета донного давления, построенные по аналогии с истечением невязкой свободной недорасширенной струи в затопленное пространство при предположении, что граничная линия тока струи касается стенки канала. Это предположение аналогично допущению о том, что наличие стенок канала не оказывает влияния на характер течения струи до момента ее встречи со стенкой, а сказывается только на изменении ее степени расширения. Анализ приводимых в работе [27] расчетных данных показывает, что

расхождение с результатами экспериментов составляет примерно 15–20%, а в некоторых случаях и больше, т.е. такая схема описывает течение весьма приближенно.

Совершенствование методов разделительной линии тока (РЛТ)

Большое влияние на развитие методов расчета донного давления при внешних и внутренних отрывных течениях оказала работа Крокко-Лиза [23], содержащая те-

орию смещения при взаимодействии диссипативного и почти изэнтропического потока, и работы [29, 22], в которых содержались основные положения модели Чепмена-Корста по расчету донного давления. В основу этой модели (рис. 2) положено предположение о том, что при натекании потока на стенку за уступом существует такая линия тока, которая отделяет часть газа, перетекающего из вязкого слоя в застойную зону от основного потока.

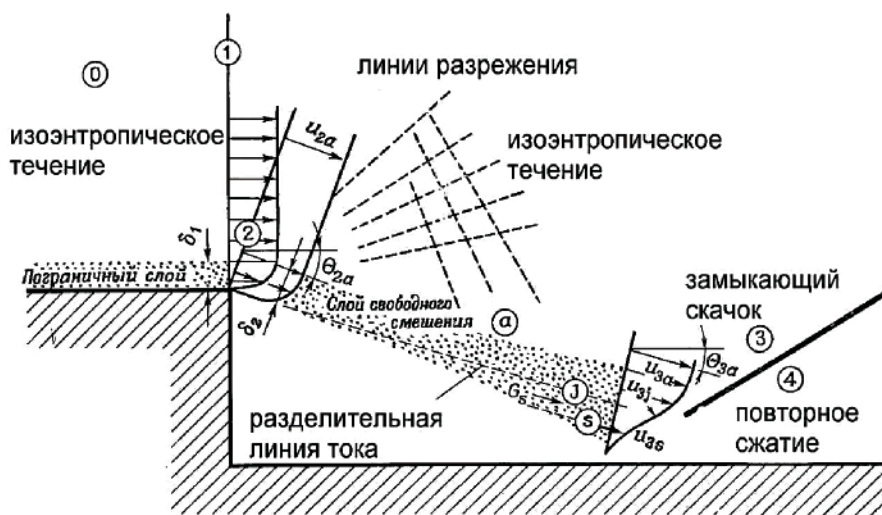


Рис. 2. Модель течения в методе РЛТ Корста

Эта линия тока, называемая разделительной линией тока (РЛТ), характеризуется в модели Чепмена-Корста таким свойством, как равенство полного давления на этой линии тока, в точке ее присоединения к стенке, максимальному статическому давлению за областью присоединения. Такое предположение позволило Корсту [22] определить донное давление за плоским уступом.

Метод РЛТ использовался Бондаревым Е.Н. [3], Эдди и Чау [30, 34] при расчете отрывного течения для оценки донного давления за уступом при течении сверхзвукового потока. В большинстве работ показано, что при течении с внезапным расширением граничная линия тока невязкой струи подходит к стенке канала не по касательной, а под некоторым углом [1, 6, 20, 32, 41, 43]. Подобное предположение сделано также в модели течения, предложенной Корстом [22], в которой, как уже отмечалось, за критерий присоединения принималось равенство полного давления на разделительной линии тока, в точке ее присоединения к стенке, максимальному статическому давлению за областью присоединения.

Как показали подробные физические исследования, в действительности этот крите-

рий не выполняется. Исследованиями Уика [54], Тагирова Р.К. [27, 28, 16], Нэша [45], Карьера и Сирье [21, 39, 48–50], Кесслера [42], Юрченка К.Е. [33], Таннера [51–53] и других авторов выявлена необходимость введения в схему Чепмена-Корста поправок, улучшающих согласование расчетных и экспериментальных данных.

В работе [45] в качестве критерия присоединения предложен параметр $N = (P_{0п} - P_d) / (P_n - P_d)$, представляющий собой отношение разности давлений в точке присоединения $P_{0п}$ и застойной зоне к разности статического давления в набегающем потоке P_n и в застойной зоне P_d . На основании экспериментальных данных, полученных для плоского течения с турбулентным пограничным слоем, были вычислены значения параметра N в зависимости от числа M набегающего потока и показано, что при сверхзвуковых скоростях величина $N = 0,35$, тогда как критерий Корста соответствует значению параметра N , равному единице.

В работах [21, 39, 48–50], выполненных в ONERA, в качестве уточненного критерия присоединения был введен угол встречи со стенкой канала границы невязкой струи, построенный методом характеристик по

определенному с помощью экспериментов отношению давлений P_d/P_0^* , где P_0^* – давление на стенке в точке натекания. Сравнение полученной таким образом зависимости $\theta = \theta(M_{гр})$, где θ – угол встречи границы струи со стенкой, а $M_{гр}$ – число Маха на границе струи. Показано, что эти значения существенно отличаются от значений, полученных в работах [22, 23].

В отличие от условия присоединения Чепмена–Корста в работе [53] рассмотрена упрощенная модель присоединения, использующая более последовательное допущение о том, что влиянием вязкости на внешней границе струи вблизи стенки можно пренебречь. Сформулированные на основе этого предположения условия присоединения и отрыва пограничного слоя обеспечивают достаточно точные результаты при использовании минимального количества единичных эмпирических постоянных.

Авторы работы [4], используя метод разделительной линии тока для расчета донного давления, предположили, что при больших значениях отношения площади сечения канала к площади среза сопла возможны различные режимы, при которых происходит взаимодействие:

первое – взаимодействие в области волн разрежения;

второе – в гиперзвуковой внутренней зоне, характер натекания в которой подобен течению от источника.

Сравнение результатов физических экспериментов и расчетных данных показало, что в разных диапазонах, определяющих параметры, опытные данные приближаются к одному или другому случаю взаимодействия. Введение дополнительной зависимости параметра присоединения позволяет уменьшить различие в значениях результатов для реальных условий течения, расположенных между двумя предельными режимами взаимодействия.

Теоретическое обоснование методов расчета донного давления

В работе [2] Благосклонов В.М. и Хомутов В.А. расчетным путем выявили влияние показателя изэнтропии газа на продольную координату и максимальные значения первого пика давления вдоль образующей канала, определение которого проводилось методом сквозного счета с использованием экспериментальных данных по донному давлению.

Теоретические аспекты зависимостей донного давления на автомодельных и неавтомодельных режимах рассматривались в работах Зеленкова О.С. [18–20]. Под неавтомодельными режимами понимались

такие режимы истечения, когда перепад между давлением на срезе сопла и давлением окружающей среды на срезе канала был недостаточно высоким. В этих случаях решение методом разделительной линии тока (РЛТ) без существенной модификации (учет продольного градиента давления) невозможно. Использование интегральных методов позволило получить ряд важных характеристик: зависимость донного давления от полного давления в струе, распределение давления вдоль стенки канала, определить момент перехода от неавтомодельных режимов к автомодельным. Разработанная методика позволила проводить численные расчеты течений в зоне смешения, возвратных течений в донную область, а также учитывать влияние вдува в эту область.

Расчет величины присоединенной массы рассматривался в работах [17, 19], выполненных Зеленковым О.С. совместно с Юрковым А.В.

Особенности течения звуковых и сверхзвуковых струй в цилиндрических и конических расширяющихся и сужающихся насадках при малых относительных площадях каналов применительно к эжекторным соплам рассматривались в работах Глотова Г.Ф. и Мороза З.К. [7]. В этих исследованиях относительная длина канала измерялась величиной высоты уступа и все данные применимы к коротким каналам, в большинстве случаев по длине меньшим, чем оптимальная длина трубы $l_{опт}$. Оптимальной принято называть длину канала, при которой можно получить абсолютно минимальное значение донного давления. Исследования преследовали цель уточнения схемы течения (рис. 2) для создания более универсального метода расчета критерия присоединения, чем критерии Корста [44] и Нэша [46]. Исследования показали, что присоединение потока к стенке канала происходит на начальном участке струи до максимального сечения соответствующей свободной струи, а присоединение разделительной линии тока к стенке канала характеризуется постоянством отношения полного давления в точке присоединения к давлению в застойной зоне. Разработанная схема течения в зоне присоединения характеризуется тем, что она содержит такие существенные элементы, как расположение разделительной линии тока в дозвуковой части вязкого слоя, разворот разделительной линии тока под углом 90° к стенке, наличие локального вихря вблизи стенки в застойной зоне, поворот на стенке граничной части основного потока в системе скачков за разделительной линией.

Интегральные методы расчета донного давления

В работах Гогиша Л.В. и Степанова Г.Ю. для расчета турбулентных отрывных течений использовались интегральные методы с применением различных форм интегральных уравнений и соотношений, полученных из уравнений пограничного слоя [26, 8–13]. Эти работы содержат результаты расчетов донного давления за телом в неограниченном потоке. Полученные в [26] зависимости относительного донного давления за уступом от располагаемого относительного полного давления для различных длин обечаек канала качественно аналогичны известным экспериментальным зависимостям для эжекторных сопел и характеризуются наличием режимов течения с замкнутой и открытой донной областью и гистерезисом характерных параметров в области перехода между ними. В отличие от результатов, в которых использовалась модель Чепмена–Корста, установлено, что располагаемое относительное полное давление, при котором происходит замыкание донной области, и значение донного давления существенно зависят от длины канала.

Заключение

Развитые в течение последних 60 лет полуэмпирические и интегральные методы расчета донного давления позволяют качественно верно описывать зависимости донного давления от основных геометрических параметров и условий во внешней среде. Однако они не в состоянии предсказывать смену режимов течения и возникновение нестационарных процессов.

Список литературы

1. Беспалов А.М., Михальченко А.Г., Серебряков В.Г. Экспериментальное исследование изменения характеристик аэродинамической трубы с камерой Эйфеля // Труды ЦАГИ. – Вып. 1616, №19. – С. 35.
2. Благосклонов В.И., Хомутов В.А. Внезапное расширение сверхзвуковой струи в канале // Уч. зап. ЦАГИ. – 1975. – Т. VI, № 3. – С. 18–24.
3. Бондарев Е.Н. Приближенная оценка влияния турбулентного пограничного слоя и отношения удельных теплот на донное давление за плоским уступом // Изв. АН СССР. Механика и машиностроение. – 1964. – № 3.
4. Ваграменко Я.А., Пучкова А.Ф. К определению донного давления при истечении осесимметричной сверхзвуковой струи в канал // Изв. АН СССР. МЖГ. – 1973. – № 6. – С. 125–129.
5. Венедикт. Обобщенное течение при внезапном расширении потока // Энергетические машины и установки. – М.: Мир, 1976. – № 3. – С. 31.
6. Гетерет. Моделирование высотных и космических условий при испытаниях // РТ. – 1962. – С. 17–31.
7. Глотов Г.Ф., Мороз Э.К. Исследование осесимметричных течений с внезапным расширением звукового потока // Труды ЦАГИ. – 1970. – Вып. 1281. – С. 31.
8. Гогиш Л.В. Приближенный расчет критических давлений присоединения и отрыва турбулентного пограничного слоя в сверхзвуковом потоке // Изв. АН СССР. МЖГ. – 1968. – № 6.
9. Гогиш Л.В. Релаксационные колебания в турбулентном ближнем следе // Изв. АН СССР. МЖГ. – 1969. – № 6.
10. Гогиш Л.В., Дашевская С.Г. Расчет сверхзвукового отрывного течения в круглых соплах с внезапным расширением // Изв. АН СССР. МЖГ. – 1979. – № 4. – С. 120–128.
11. Гогиш Л.В., Степанов Г.Ю. Интегральный метод расчета турбулентных отрывных течений (III Всесоюзный съезд по теоретической и прикладной механике). Аннотации докладов. – М.: АН СССР. – 1968.
12. Гогиш Л.В., Степанов Г.Ю. К расчету донного давления в двумерных сверхзвуковых течениях // Изв. АН СССР. МЖГ. – 1966. – № 3.
13. Гогиш Л.В., Степанов Г.Ю. Квазиодномерная теория взаимодействия турбулентного следа со сверхзвуковым потоком в канале и струе: науч. тр. Института механики МГУ. – 1971. – № 11.
14. Гусев В.К. К вопросу о запуске сверхзвуковых сопел // Инженерный журнал, 1961. – № 1.
15. Давидсон В.Е., Нещерет П.А. Давление на стенке широкой части ступенчатой трубы при сверхзвуковом течении: сб. Гидроаэромеханика и теория упругости. – Днепропетровск ун-т, 1976. – Вып. 21. – С. 70–75.
16. Ефремов Н.Л., Тагиров Р.К. Расчет донного давления в эжекторных соплах различной длины при нулевом коэффициенте эжекции // Изв. АН СССР. МЖГ. – 1976. – № 6. – С. 164–166.
17. Зеленков О.С. Коэффициент трения и присоединенная масса сверхзвуковой струи // Газодинамика и теплообмен. – 1973. – № 3. – С. 105–113.
18. Зеленков О.С. Течение в донной области канала на неавтомоделных режимах: сб. Газодинамика и теплообмен. – ЛГУ, 1982. – №7. – С. 151–162.
19. Зеленков О.С., Юрков А.В. Донное давление при внезапном расширении звукового потока // Вестник ЛГУ, 1966. – Вып. 2, № 7.
20. Зеленков О.С. Течение в донной области во внутренней задаче // Газодинамика и теплообмен. – 1980. – Вып. 6. – С. 152–159.
21. Карье П. Исследование присоединения потока, проведенное в авиационном научно-исследовательском комитете (ONERA), Технический перевод, БНЦ ЦАГИ // Обзоры. Переводы. Рефераты. – 1966. – № 189.
22. Корст Г. Теория определения донного давления в околозвуковом и сверхзвуковом потоках. – М.: Механика, 1957. – №5. – С. 49–63.
23. Крокко Л., Лиз А. Теория смещения для определения взаимодействия диссипативного и почти изоэнтропического потока // ВРГ. – 1953. – №2.
24. Лейтес Е.А., Нестеров Ю.Н., Хомутов В.А. Распространение сверхзвуковой струи в канале с внезапным расширением // Труды ЦАГИ. – 1975. – Вып. 1672. – С. 14.
25. Нещерет П.А. Исследование условий автомоделности сверхзвукового течения в цилиндрической трубе // Гидроаэромеханика и теория упругости. – Днепропетровск, 1975. – Вып. 19. – С. 50–54.
26. Степанов Г.Ю., Гогиш Л.В. Квазиодномерная газодинамика сопел реактивных двигателей. – М.: Машиностроение, 1973. – С. 167.
27. Тагиров Р.К. Определение донного давления и донной температуры при внезапном расширении звукового и сверхзвукового потоков // Изв. АН СССР, Механика и машиностроение. – 1961. – № 5.
28. Тагиров Р.К. Влияние начального пограничного слоя на донное давление // Изв. АН СССР. МЖГ. – 1966. – № 2. – С. 45–57.

29. Хорнер С., Чепмен Д., Уик Р. К вопросу о донном вакууме // BPT. – 1954. – №4.
30. Чау Эдди. Взаимодействие между основным и вторичным потоками сверхзвуковых эжекторных систем и их рабочие характеристики // Ракетная техника и космонавтика. – 1964. – № 4. – С. 91–104.
31. Чухало Н.А., Давидсон В.Е. О запуске сверхзвуковых сопел с помощью цилиндрических диффузоров: сб. Гидроаэромеханика и теория упругости. – Харьков: Изд-во ХГУ, 1968. – Вып. 7. – С. 33–36.
32. Шишков А.А. Газодинамика пороховых ракетных двигателей. – М.: Машиностроение, 1968. – С. 148.
33. Юрченко К.Е. Влияние пограничного слоя в точке отрыва на донное давление в сверхзвуковом потоке газа // Труды ЛИАП. – 1974. – Вып. 85. – С. 88–99.
34. Addy A.L., Chow W.L. On the starting characteristics of supersonic ejector system // Trans ASME. Ser. D. – 1964. – Vol 86, № 4.
35. Anderson J.S., Meier G.E.A. Sonic flow through an abrupt change in cross-section // Proc. Inst. Mech. Eng. – 1984. – №12. – P. 197–203.
36. Anderson J.S., Willams T.J. Base pressure and noise produced by the abrupt expansion of air in a cylindrical duct // J. Mech. Engng Sci. – 1968. – Vol. 10, №3. – P. 262–268.
37. Batson J.L., Bertin J.J. Rocket exhaust flow In tube launchers // J. of Spacecraft and Rockets. – 1974. – Vol. 11. – P. 730–790.
38. Bertin J. J., Batson J.L. Experimentally determined rockets-exhaust flow field in constructive tube launchers // J. of Spacecraft and Rocket. – 1975. – Vol 12. – P. 711–717.
39. Carriere P., Sirieix M. Factours d'influence du recollement d'un écoulement supersonique. Paper presented, to 10th Internationale Congress of Applied Mechanics. Stresa. – September 1960.
40. Fabri J., Siestrunk R. Supersonic air ejectors // Advances in applied mechanics. – Academic Press Ins., New York, 1958. – Vol. 5.
41. Jungowski W.M. Investigation of flow pattern, boundary conditions and oscillation mechanism in a compressible flow through sudden enlargement of a duct // Warsaw, Tech, Only Publ. – 1968. – № 3. – P. 79.
42. Kessler T.J. A theory for two-dimensional siperponic turbulent base flows // AIAA Pap. – 1969. – № 69.
43. Khan M. Ikram. Flow patterns of supersonic flow in ducts with sudden area changes // Flow visualisat III Proc. 3rd Int Symp. Ann. Arbor. Mech. – Sept 6-9 1983. – P. 483–487.
44. Korst H.H. A theory for base pressure in transonic and supersonic flow // Trans ASME. Journal of applied Mechanics 23. – 1956. – №4. – P. 593–600.
45. Nash J.P. The effect of an initial boundary layer on the development of a turbulent free shear layer // ARC C.P. 682. – July 1962.
46. Nash T.F. An analisis of two-dimensional turbulent base flow including the effect of approaching boundary layer // ARC R&M. – 1963. – № 3344. – P. 1–39.
47. Oiknine G., Portanier J.M. Etude des ejectours cyllndriques a flux Induit mil // Doc-Air-Espace. – 1968. – № 108. – P. 41–56.
48. Sirieux M., Mirande J., Delery J. Exoerlmences fondamentales sur le recollement turbulent d'un jet supersonique // ONERA. – 1966. – T.P. № 326.
49. Sirieux M., Mirande J., Delery J. Recherches experimentales fondamentales sur les écoulements sepaes et appliications // ONERA. – 1967. – T.P. 287.
50. Sirieux M., Mirande J., Delery J. Recherches experimentales fondamentales sur les écoulements sepaes et appliications // ONERA. – 1967. – T.P. 520.
51. Tanner M. Druckverteilungsmessungen on Keilei in kompressiblar Strommungen // Z. Flugwissenschaft. – 1970. – Vol. 18, heft 16. – P. 202–208.
52. Tanner M. Two-different thretorical approacher to the pressure problem. In two-dimensional supersonic flow // The Aeronotical Querterly. – 1978. – Vol. 30, part 2. – P. 114–130.
53. Tanner M. Theoretical prediction of base pressure for steady base flow // Progress in Aerospace Sciences. – 1973. – Vol 14. – P. 177–225.
54. Wick R.S. Effect of boundary layer on sonic flow through an abrupt cross-sectional area change // J. aero Sci. – 1953. – 20(№ 10). – P. 675–682.

References

1. Bespalov A.M., Mihal'chenko A.G., Serebrjakov V.G. Jekspiermental'noe issledovanie izmenenija harakteristik ajerodinamicheskoy truby s kameroj Jeffelja // Trudy CAGI. Vyp. 1616, no. 19. pp. 35.
2. Blagoslkonov V.I., Homutov V.A. Vnezapnoe rasshirenie sverhzhukovoy strui v kanale // Uch. zap. CAGI. 1975. T. VI, no. 3. pp. 18–24.
3. Bondarev E.N. Priblizhennaja ocenka vlijanija turbulentnogo pogranichnogo sloja i otnoshenija udel'nyh teploemkostej na donnoe davlenie za ploskim ustupom // Izv. AN SSSR. Mehanika i mashinostroenie. 1964. no. 3.
4. Vagramenko Ja.A., Puchkova A.F. K opredeleniju donnogo davlenija pri istechenii osesimmetrichnoj sverhzhukovoy strui v kanal // Izv. AN SSSR. MZhG. 1973. no. 6. pp. 125–129.
5. Venedikt. Obobwennoe techenie pri vnezapnom rasshirenii potoka. Jenergeticheskie mashiny i ustanovki. M.: Mir, 1976. no. 3. p. 31.
6. Geteret. Modelirovanie vysotnyh i kosmicheskikh uslovij pri ispytaniyah // RT, 1962. pp. 17–31.
7. Glotov G.F., Moroz Je.K. Issledovanie osesimmetrichnyh techenij s vnezapnym rasshireniem zvukovogo potoka // Trudy CAGI. 1970. Vyp. 1281. pp. 31.
8. Gogish L.V. Priblizhennyj raschet kriticheskikh davlenij prisoedinenija i otryva turbulentnogo pogranichnogo sloja v sverhzhukovom potoke // Izv. AN SSSR. MZhG. 1968. no. 6.
9. Gogish L.V. Relaksacionnye kolebanija v turbulentnom blizhnem slede // Izv. AN SSSR. MZhG. – 1969. no. 6.
10. Gogish L.V., Dashevskaja S.G. Raschet sverhzhukovogo otryvnogo techenija v kruglyh soplah s vnezapnym rasshireniem // Izv. AN SSSR. MZhG, 1979. no. 4. pp. 120–128.
11. Gogish L.V., Stepanov G.Ju. Integral'nyj metod rascheta turbulentnyh otryvnyh techenij (III Vsesojuznyj s#ezd po teoreticheskoy i prikladnoj mehanike). Annotacii dokladov. M.: AN SSSR. – 1968.
12. Gogish L.V., Stepanov G.Ju. K raschetu donnogo davlenija v dvumernyh sverhzhukovyh techenijah // Izv. AN SSSR. MZhG, 1966. no. 3.
13. Gogish L.V., Stepanov G.Ju. Kvaziodnomernaja teorija vzaimodejstvija turbulentnogo sleda so sverhzhukovym potokom v kanale i strue: nauch. tr. / Institut mehaniki MGU. 1971. no. 11.
14. Gusev B.K. K voprosu o zapuske sverhzhukovyh sopel // Inzhenernyj zhurnal, 1961. no. 1.
15. Davidson V.E., Neweret P.A. Davlenie na stenke shirokoj chasti stupenchatoj truby pri sverhzhukovom techenii: sb. Gidroaeromehanika i teorija uprugosti. – Dnepropetrovsk un-t. 1976. Vyp. 21. pp. 70–75.
16. Efremov N.L., Tagirov R.K. Raschet donnogo davlenija v jezhktornyh soplah razlichnoj dliny pri nulevom koefficiente jezhekcii // Izv. AN SSSR. MZhG, 1976. no. 6. pp. 164–166.
17. Zelenkov O.S. Koefficient trenija i prisoedinennaja massa sverhzhukovoy strui: sb. Gazodinamika i teploobmen, 1973. no. 3. pp. 105–113.

18. Zelenkov O.S. Techenie v donnoy oblasti kanala na neavtomodel'nyh rezhimakh: sb. Gazodinamika i teploobmen, LGU, 1982. no. 7. pp. 151–162.
19. Zelenkov O.S., Jurkov A.V. Donnoe davlenie pri vnezapnom rasshirenii zvukovogo potoka // Vestnik LGU, 1966. Vyp. 2, no. 7.
20. Zelenkov O.S. Techenie v donnoy oblasti vo vnutrennej zadache: kn. Gazodinamika i teploobmen. 1980. Vyp. 6. pp. 152–159.
21. Kar'e P. Issledovanie prisoedinenija potoka, provedennoe v aviacionnom nauchno-issledovatel'skom komitete (ONERA), Tehniceskij perevod, BNC CAGI, Obzory. Perevody. Referaty. 1966. no. 189.
22. Korst G. Teorija opredelenija donnogo davlenija v okolozvukovom i sverhzvukovom potokah. – M.: Mekhanika, 1957. no. 5. pp. 49–63.
23. Krokko L., Liz A. Teorija smeshenija dlja opredelenija vzaimodejstija dissipativnogo i pochti izjotropicheskogo potoka // VRT, 1953. no. 2.
24. Lejtes E.A., Nesterov Ju.N. Homutov V.A. Rasprostranenie sverhzvukovoj strui v kanale s vnezapnym rasshireniem // Trudy CAGI. 1975. Vyp. 1672. pp. 14.
25. Neweret P.A. Issledovanie uslovij avtomodel'nosti sverhzvukovogo techenija v cilindricheskoj trube: sb. Gidrodinamika i teorija uprugosti. Dnepropetrovsk, 1975. Vyp. 19. pp. 50–54.
26. Stepanov G.Ju., Gogish L.V. Kvaziodnomernaja gazodinamika sopol reaktivnyh dvigatelej. – M.: Mashinostroenie, 1973. pp. 167.
27. Tagirov P.K. Opredelenie donnogo davlenija i donnoj temperatury pri vnezapnom rasshirenii zvukovogo i sverhzvukovogo potokov // Izv. AN SSSR, Mekhanika i mashinostroenie. 1961. no. 5.
28. Tagirov R.K. Vlijanie nachal'nogo pogranichnogo sloja na donnoe davlenie // Izv. AN SSSR. MZhG, 1966. no. 2. pp. 45–57.
29. Horner S., Chepmen D., Uik R. K voprosu o donnom vakuumе // VRT, 1954. no. 4.
30. Chau, Jedd. Vzaimodejstvie mezhdru osnovnym i vtorichnym potokami sverhzvukovyh jezhektornyh sistem i ih rabochie harakteristiki // Raketnaja tehnika i kosmonavtika, 1964. no. 4. pp. 91–104.
31. Chuhalo N.A., Davidson V.E. O zapuske sverhzvukovyh sopol s pomow'ju cilindricheskih diffuzorov: sb. Gidrodinamika i teorija uprugosti. Har'kov, izd-vo HGU. 1968. Vyp. 7. pp. 33–36.
32. Shishkov A.A. Gazodinamika porohovyh raketnyh dvigatelej. M.: Mashinostroenie, 1968. pp. 148.
33. Jurchenok K.E. Vlijanie pogranichnogo sloja v točke otrывa na donnoe davlenie v sverhzvukovom potoke gaza // Trudy LIAP. 1974. Vyp. 85. pp. 88–99.
34. Addy A.L., Chow W.L. On the starting characteristics of superersonic ejector system // Trans ASME. Ser. D. 1964. vol 86, no. 4.
35. Anderson J.S., Meier G.E.A. Sonic flow through an abrupt change in cross-section // Proc. Inst. Mech. Eng. 1984. no. 12. pp. 197–203.
36. Anderson J.S., Willams T.J. Base pressure and noise produced by the abrupt expansion of air in a cylindrical duct // J. Mech. Engng Sci. 1968. Vol. 10, no. 3. pp. 262–268.
37. Batson J.L., Bertin J.J. Rocket exhaust flow In tube launchers // J. of Spacecraft and Rockets. 1974. Vol 11. P. 730–790.
38. Bertin J.J., Batson J.L. Experimentally determined rockets-exhaust flow field in constructive tube launchers // J. of Spacecraft and Rocket. 1975. Vol 12. pp. 711–717.
39. Carriere P., Sirieix M. Factours d'influence du recollement d'un ecoulement supersonique. Paper presented, to 10th Internationale Congress of Applied Mechanics. Stresa. – September 1960.
40. Fabri J., Siestrunk R. Supersonic air ejectors // Advances in applied mechanics. – Academic Press Ins., New York 1958. Vol. 5.
41. Jungowski W.M. Investigation of flow pattern, boundary conditions and oscillation mechanism in a compressible flow through sudden enlargement of a duct // Warsaw, Tech, Only Publ. 1968. no. 3. pp. 79.
42. Kessler T.J. A theory for two-dimensional siperponic turbulent base flows // AIAA Pap. 1969. no. 69.
43. Khan M. Ikram. Flow patterns of supersonic flow in ducts with sudden area changes // Flow visualisat III Proc. 3rd Int Symp. Ann. Arbor. Mech. Sept 6-9 1983. pp. 483–487.
44. Korst H.H. A theory for base pressure in transonic and supersonic flow // Trans ASME. Journal of applied Mechanics 23. 1956. no. 4. pp. 593–600.
45. Nash J.P. The effect of an initial boundary layer on the development of a turbulent free shear layer // ARC C.P. 682. June 1962.
46. Nash T.F. An analusis of two-dimensional turbulent base flow including the effect of approaching boundary layer // ARC R&M. 1963. no. 3344. pp. 1–39.
47. Oiknine G., Portanier J.M. Etude des ejectours cylindriques a flux Induit mil // Doc-Air-Espace, 1968. no. 108. pp. 41–56.
48. Siriex M., Mirande J., Delery J. Exoerlmences fondamentales sur le recollement turbulent d'un jet supersonique. ONERA. 1966. T.P. № 326.
49. Siriex M., Mirande J., Delery J. Recherches experimentales fondamentales sur les ecoulements sepaes et appliocations. ONERA. 1967. T.P. 287.
50. Siriex M., Mirande J., Delery J. Recherches experimentales fondamentales sur les ecoulements sepaes et appliocations. ONERA. 1967. pp. 520.
51. Tanner M. Druckverteilungsmessungen on Keilei in kompressiblbar Strommungen. Z. Flugwissenschaft, 1970. Vol. 18, heft 16. pp. 202–208.
52. Tanner M. Two-different threoretical approacher to the pressure problem. In two-dimensional supersonic flow. The Aer-onotical Querterly. 1978. Vol. 30, part 2. pp. 114–130.
53. Tanner M. Theoretical prediction of base pressure for steady base flow. Progress in Aerospace Sciences. 1973. Vol 14. pp. 177–225.
54. Wick R.S. Effect of boundary layer on sonic flow through an abrupt cross-sectional area change // J. aero Sci. 1953. 20(no. 10). pp. 675–682.

Рецензенты:

Усков В.Н., д.т.н., профессор, профессор кафедры гидроаэромеханики Санкт-Петербургского государственного университета, г. Санкт-Петербург;

Матвеев С.К., д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой гидроаэромеханики Санкт-Петербургского государственного университета, г. Санкт-Петербург;

Арютов Б.А., д.т.н., зав. кафедрой прикладной механики, профессор ФГОУ ВПО «Нижегородская ГСХА», г. Нижний Новгород.
Работа поступила в редакцию 20.02.2012.