

$$\left\{ \begin{aligned} \hat{Y}_t^{(1)} &= -144 - 0,92 Y_t^{(2)} - 0,04 X_t^{(3)} - 0,96 X_t^{(4)} + 0,14 X_t^{(6)} + 0,07 X_t^{(8)} - 0,03 X_t^{(9)} - 0,04 X_t^{(11)}, \\ &\quad (19,66) \quad (2,03) \quad (-4,4) \quad (-4,45) \quad (5,36) \quad (3,81) \quad (-3,88) \quad (-3,9) \\ R^2 &= 0,565 \\ \hat{Y}_t^{(2)} &= -67,49 + 0,79 Y_t^{(4)} + 0,003 Y_t^{(6)} - 0,02 X_t^{(1)} - 0,005 X_t^{(3)}, R^2 = 0,753 \\ &\quad (-7,34) \quad (8,92) \quad (2,82) \quad (-9,46) \quad (-2,46) \\ \hat{Y}_t^{(3)} &= -3,36 + 0,07 Y_t^{(1)} - 0,001 Y_t^{(6)} + 0,009 X_t^{(1)} - 0,17 X_t^{(4)} + 0,002 X_t^{(10)}, R^2 = 0,932 \\ &\quad (-2,29) \quad (2,07) \quad (-2,05) \quad (2,36) \quad (-2,8) \quad (15,49) \\ \hat{Y}_t^{(4)} &= 109,16 + 0,25 Y_t^{(3)} - 0,06 X_t^{(2)} - 0,09 X_t^{(4)} - 0,0004 X_t^{(10)}, R^2 = 0,601 \\ &\quad (89,31) \quad (2,75) \quad (-8,11) \quad (-3,03) \quad (-2,71) \\ \hat{Y}_t^{(5)} &= 325,29 - 8,69 Y_t^{(1)} - 2,85 Y_t^{(6)} + 12,39 X_t^{(5)} + 0,39 X_t^{(7)} - 0,06 X_t^{(10)}, R^2 = 0,995 \\ &\quad (2,36) \quad (-2,03) \quad (-9,24) \quad (20,93) \quad (8,56) \quad (-2,81) \\ \hat{Y}_t^{(6)} &= 9749,774,97 Y_t^{(1)} - 82,49 Y_t^{(4)} - 29,72 X_t^{(4)} + 2,41 X_t^{(6)} - 0,04 X_t^{(10)}, R^2 = 0,808 \\ &\quad (3,69) \quad (-2,42) \quad (-3,51) \quad (-4,08) \quad (7,75) \quad (-2,61) \end{aligned} \right. \quad (2)$$

Каждое уравнение полученной СОУ (2) и оценки структурных параметров статистически значимы по *F*- и *t*-критериям.

Анализ полученных характеристик позволяет сделать вывод, что качество построенной эконометрической модели достаточно высокое. Приведённая форма этой модели может быть использована для краткосрочного прогнозирования значений

факторов, характеризующих стабилизирующие процессы.

Чтобы проверить устойчивость модели (2), ее чувствительность к внешнему шоку в виде кризиса 2008 г. в России, была проведена оценка параметров структурной формы (1) по данным за период с апреля 1999 г. по июль 2008 г. (то есть не включая статистические данные экономического кризиса 2008 г.). Полученная СОУ имеет вид:

$$\left\{ \begin{aligned} \hat{Y}_t^{(1)} &= 175 - 1,03 Y_t^{(2)} - 0,01 X_t^{(3)} - 1,09 X_t^{(4)} + 0,01 X_t^{(6)} + 0,03 X_t^{(8)} - 0,01 X_t^{(9)} - 0,05 X_t^{(11)} \\ \hat{Y}_t^{(2)} &= -45,3 + 0,56 Y_t^{(4)} + 0,004 Y_t^{(6)} - 0,01 X_t^{(1)} - 0,01 X_t^{(3)} \\ \hat{Y}_t^{(3)} &= -9,66 + 0,1 Y_t^{(1)} - 0,003 Y_t^{(6)} + 0,002 X_t^{(1)} - 0,01 X_t^{(4)} + 0,002 X_t^{(10)} \\ \hat{Y}_t^{(4)} &= 108,13 + 0,07 Y_t^{(3)} - 0,05 X_t^{(2)} - 0,07 X_t^{(4)} - 0,0004 X_t^{(10)} \\ \hat{Y}_t^{(5)} &= 199,86 - 5,35 Y_t^{(1)} - 3,45 Y_t^{(6)} + 15,18 X_t^{(5)} + 0,24 X_t^{(7)} - 0,08 X_t^{(10)} \\ \hat{Y}_t^{(6)} &= 4884,52 - 4,9 Y_t^{(1)} - 37,87 Y_t^{(4)} - 18 X_t^{(4)} + 1,79 X_t^{(6)} - 0,01 X_t^{(10)} \end{aligned} \right. \quad (3)$$

Сравнивая СОУ (2) и (3), можно сделать следующие выводы: статистически значимых различий между большинством оценок соответствующих структурных параметров не обнаружено; взаимосвязи и направление связи между показателями, отражающими стабилизационные процессы России, сохранились (все знаки перед структурными коэффициентами в СОУ (3) не изменились). Следовательно, СОУ (2) оказалась устойчивой к внешнему воздействию в виде кризиса 2008 г. Для получения точных прогнозных значений с помощью разработанной модели необходимо продолжить исследование ее устойчивости к внешним воздействиям, например, с помощью метода Монте-Карло.

Список литературы

1. Гусев Н.С. Два кризиса: Сравнительный анализ событий 1998 и 2008-2009 годов / Гусев Н.С., Широков А.А. // Проблемы прогнозирования. – 2009. – № 5. – С. 3–20.
2. Осадчая И.М. Кризис пришел. Что делать государству? // Наука и жизнь. – 2008. – № 12. – С. 25–37.

3. Смирнов С.Н. Российские домохозяйства: компаративный анализ социальных последствий экономических кризисов // Мир России. – 2010. – №3. – С. 115–131.

4. Ширнаева С.Ю. Применение теста Грэнжера при моделировании взаимосвязей основных социально-экономических показателей // Проблемы и перспективы Российской экономики: сборник статей V-й Всерос. науч.-практ. конф. (Пенза, 15-16 марта 2006 г.). – Пенза, 2006. – С. 139–141.

5. Краткосрочные экономические показатели. – М., 2011. – URL: http://www.gks.ru/bgd/regl/b11_02/Main.htm (дата обращения: 1.10.2011).

6. Пятенко С.В. Российские причины кризиса и борьба с ним. – URL: http://www.cfin.ru/anticrisis/macroeconomics/government_program/lessons.shtml (дата обращения: 3.10.2011).

Рецензенты:

Корнеева Т.А., д.э.н., профессор кафедры «Бухгалтерский учет и аудит» Самарского института бизнеса и управления, г. Самара;
Коновалова М.Е., д.э.н., доцент, профессор Самарского института (филиал) ФГБОУ ВПО «Российский государственный торгово-экономический университет», г. Самара.
Работа поступила в редакцию 08.11.2011.

Технические науки

УДК 629.1, 629.7, 623.74

**ИСТОРИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ДОННОГО ДАВЛЕНИЯ**¹Засухин О.Н., ²Булат П.В., ²Продан Н.В.¹*Балтийский государственный технический университет им. Д.Ф. Устинова;*²*ООО «ВНХ-Проект» НОЦ «Механика», Санкт-Петербург, e-mail: kolinti@mail.ru*

Приводится обзор исследований отрывных течений в окрестности донных частей летательных аппаратов, а также сопловых устройств с разрывом образующей, проводившихся с начала 50-х годов прошлого века. Даны определения донному давлению, донным областям различных типов. Описана постановка задачи исследования отрывного течения в канале с внезапным расширением потока. Рассмотрена история экспериментального изучения зависимости донного течения в канале от конструктивных параметров и условий в окружающей среде. Уделено внимание публикациям, посвященным определению физической картины течения в каналах и эжекторах.

Ключевые слова: донное давление, донное сопротивление, отрывные течения, течения с внезапным расширением

HISTORY OF EXPERIMENTAL RESEARCH BASE PRESSURE¹Zasuhin O.N., ²Bulat P.V., ²Prodan N.V.¹*Baltiysky State Technical University of Ustinov;*²*«VNH-Project» ltd SEC «Mechanics», St. Petersburg, e-mail: kolinti@mail.ru*

Provides an overview of studies of separated flows in the vicinity of the bottom of the aircraft, as well as ejector nozzles, held since the beginning of the 50s of last century. Definitions base mode pressure, base areas of different types. We describe the formulation of the objectives of the study of separated flow in a channel with sudden expansion flow. The history of the pilot study the dependence of bottom flow in a channel on the design parameters and conditions in the environment. Attention is paid to the publications on the definition of the physical picture of flow in channels and ejectors. Includes links to all the relevant work in this important domain. The review will be useful for specialists working on the creation of new high-speed transportation systems.

Keywords: base pressure, base drag, separated flows, flow with sudden expansion

Одной из самых актуальных задач, возникающих при проектировании авиационных и ракетно-космических транспортных систем, является задача уменьшения донного сопротивления. На протяжении минимум шестидесяти последних лет для моделирования течений в окрестности донных частей летательных аппаратов, а также в соплах двигательных установок использовалось изучение течения в цилиндрическом канале с внезапным расширением потока.

Среди многих задач газовой динамики, связанных с взаимодействием сверхзвуковых струй с преградами, течение сверхзвуковых струй в каналах с внезапным расширением представляет особый вид, относящийся к отрывным, а сама задача, в некотором смысле, является классической. Такие течения реализуются в различных технических устройствах ракетно-космических и лазерных комплексов: в пусковых трубах стартовых установок, соплах с разрывом образующей, диффузорах высотных стендов и технологических установках промышленности: фурмах и дутьевых устройствах металлургических печей, в газовой

арматуре и трубопроводах химической промышленности.

Задача изучения сверхзвукового отрывного течения с внезапным расширением потока в цилиндрическом канале

Явление турбулентного отрыва, как и всякое явление природы, по мере углубленного изучения представляется все более сложным по своим свойствам, формам и проявлениям. Однако, с практической точки зрения, в исследовании турбулентного отрыва достигнут несомненный прогресс, благодаря чему наличие развитого отрыва и его главные свойства можно предсказать и правильно учитывать при проектировании технических устройств. Разнообразие реальных отрывных турбулентных течений, их сложная физическая природа и отсутствие общей теории приводят к необходимости сочетания физического эксперимента и расчетных приближенных и аналитических исследований в большей степени, чем в других разделах газовой динамики. Задача о распространении сверхзвуковых струй в каналах с внезапным рас-

ширением (рис. 1) является традиционной для прикладной газовой динамики. Интенсификация исследований в данном направ-

лении обусловлена требованиями практики создания новой транспортной техники,

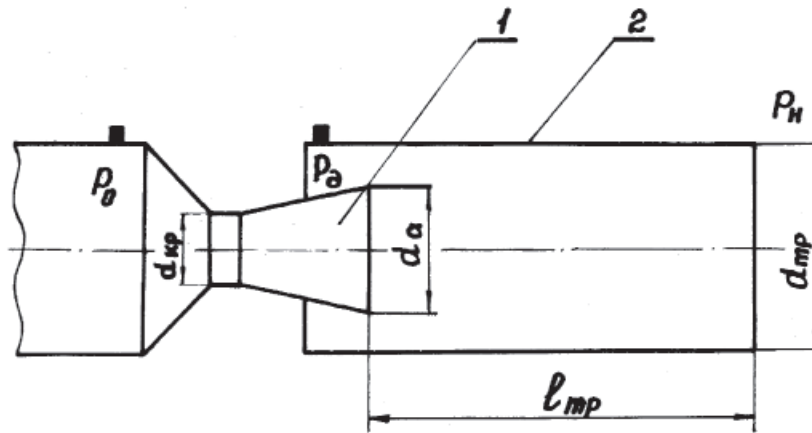


Рис. 1. Геометрия канала с внезапным расширением

в том числе, рассчитанной на сверхзвуковые скорости полета.

На рис. 1 представлены параметры, однозначно характеризующие геометрию сопла 1 и канала 2. Это d_{kp} – радиус критического сечения сопла, d_a – диаметр выходного сечения сопла, θ – угол полураствора сопла на его срезе, d_{mp} – диаметр канала, l_{mp} – длина канала.

Отрывные течения в каналах

Исследованию внутренних отрывных течений и связанному с ними донному давлению посвящено большое количество работ. В книге «Основы газовой динамики» [5] первым исследователем течения с внезапным расширением назван Нуссельт, проводивший эксперименты с трансзвуковыми струями, истекающими из сужающихся конических сопел. Он сравнил полученные результаты с расчетом по одномерной теории.

Потребности бурно развивающейся авиационной техники, а чуть позже ракетной, стимулировали исследования внутренних отрывных течений. Такие исследования проводились во многих странах и приблизительно одновременно появились публикации, посвященные исследованиям процессов, протекающих в каналах при истечении сверхзвуковой струи из сопел, и особенностям изменения донного давления. Можно указать работы Ньюмена и Лустверка – 1949 г. [26, 27], Чепмена – 1950 г. [17], Лукашевича – 1953 г. [24], Фабри и Ситрунка – 1958 г. [19], Корста – 1956 г. [23], Эгинка – 1955 г. [14], Карашимы – 1961 г. [22]. Одной из важнейших постановочных работ по проблеме донного давления явля-

ется работа Чау [18]. В нашей стране публикации в открытой печати появились позднее, но это не означало, что исследования в этом направлении не проводились.

Одномерный подход использовался и при рассмотрении течения газа в трубе И.П. Гинзбургом [2] для определения потерь донного давления после расширения при сверхзвуковом движении газа по узкому участку трубы. Ссылаясь на экспериментальные данные Уика [28] по донному давлению, был определен коэффициент потерь полного давления. В книге [2] рассмотрен также такой режим истечения, когда в широкой части трубы возможно появление прямого скачка уплотнения, то есть такой малой области, при переходе через которую скорость скачком изменяется со сверхзвуковой в дозвуковую, а давление резко возрастает. Для определения давления адиабатически заторможенного газа за скачком использована формула Рэля.

Исследование эжекторных систем без вторичного потока, с цилиндрическими камерами смешения с использованием одномерного подхода выполнено в работе [5]. Используя уравнения сохранения энергии и учитывая силу трения по поверхности камеры смешения, определены диапазоны существования решения уравнений для расчета относительного донного давления.

В своих исследованиях Фабри и Ситрунка [19], используя конические и профилированные расширяющиеся сопла с $M_a = 1,836$, выявили существование трех режимов работы эжектора: смешанного, переходного и сверхзвукового, во время которых происходит течение газа в канале

с различными скоростями; показали существование минимальных предельных величин донного давления для профилированного и конического сопла и последующее увеличение его с возрастанием полного давления на входе в сопло. Для физической иллюстрации режимов течения в работе [19] приведена серия шпиренфотографий волновых структур, полученных на плоской установке с прозрачными стенками и соответствующих различным фазам установления сверхзвукового течения газа по каналу, начиная с отрывного течения в плоском сопле до отделения донной области от внешней атмосферы и формирования X-образных скачков уплотнения. Обращено внимание на то, что моменту запираания донной области соответствует такой поперечный размер струи, который превышает площадь поперечного сечения канала. Расширению струи препятствуют стенки канала.

Исследование донного сопротивления снарядов

Работы в области баллистики снарядов длительное время были связаны с проблемой внезапного расширения внешнего сжимаемого потока за донным срезом снарядов и донным давлением. Значительную часть общего сопротивления составляет сопротивление, вызванное донным разрежением. Сейчас известно, что при больших скоростях полета донное давление ниже атмосферного. Методы, связанные с баллистическими испытаниями, позволяли исследовать только зависимость донного давления от числа Маха полета. Серия экспериментов Чепмена показала, что пограничный слой оказывает определенное влияние на донное давление. Чепмен также предложил экспе-

риментальный критерий зависимости донного давления от модифицированной толщины пограничного слоя.

Внутренняя и внешняя донная область

При всей аналогии внешнего и внутреннего отрывных течений существуют и различия между ними. Эти различия заключаются в том, что в канале потока пограничного слоя почти постоянно пересекаются с характеристиками волны разрежения, чего нет при внешнем обтекании. Точка пересечения первой характеристики волны разрежения с границей пограничного слоя дает максимально возможное разрежение при данном числе Маха и, следовательно, более низкое донное давление для струи, пересекаемой линиями Маха. Кроме того, напряжения сдвига и отрыв пограничного слоя во внешних и внутренних потоках неэквивалентны.

Различие заключается также и в том, что расширяющийся внешний поток стекается к приосевой зоне (рис. 2), образуя при отсутствии донного вдува возвратное течение к дну снаряда и замкнутую донную область с рециркуляционным течением. При наличии вдува, например, через сопло, донная область с рециркуляционным течением имеет торроидальную форму (рис. 3). При внутренних течениях в канале расширяющийся за срезом сопла поток растекается по стенке канала и образует замкнутую донную область, возвратное течение в которой направлено вдоль стенки канала (рис. 4). Если полное давление перед соплом недостаточно, то между границей струи и стенкой канала образуется кольцевой зазор, в который устремляется газ из окружающей среды (рис. 5).

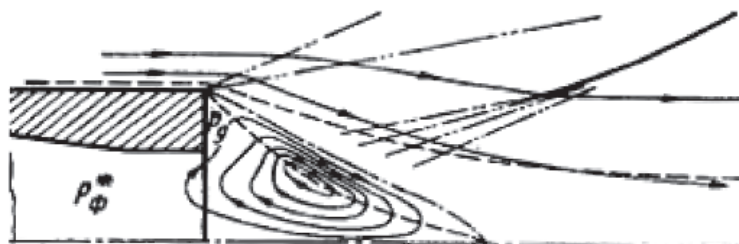


Рис. 2. Внешнее отрывное течение при отсутствии вдува в донную область



Рис. 3. Внешнее отрывное течение и торроидальная донная область при наличии вдува



Рис. 4. Внутреннее отрывное течение в канале. Донная область закрыта



Рис. 5. Внутреннее отрывное течение в канале. Донная область открыта

Исследования, направленные на определение картины течения в канале

Проведенные позднее экспериментальные исследования отрывных сверхзвуковых течений способствовали более глубокому и всестороннему изучению этого явления. Основное внимание по-прежнему обращалось на получение достоверной картины течения сверхзвукового потока в канале и количественных зависимостей по донному давлению. К таким исследованиям относятся работы, проведенные Андерсоном и Вильямсом [16], Мартином и Бейкером [25] и Юнговски [20, 21]. Все эти работы содержат исследования течения звуковых и сверхзвуковых струй в каналах с внезапным расширением и визуализацией волновой структуры при использовании плоских установок с прозрачными стенками. В работах представлены либо фотографии волновой структуры, полученные с помощью теневого способа, либо интерферограммы, соответствующие различным фазам формирования потока в канале.

В работе [16] приведена схема течения плоского сверхзвукового потока вблизи среза сопла с выделением циркуляционного течения в донной области, показаны особенности взаимодействия границы струи со стенкой канала и формирования отраженного скачка, проходящего затем через зону волн разрежения Прандтля – Майера. Для осесимметричного канала ограниченной длины, проведено исследование изменения донного давления P_0 в зависимости от полного давления P_0 [25]. Исследования показали существование типичных зависимостей изменения донного давления для

звукового сопла и гистерезисных явлений, сопровождающих перестройку волновой структуры при повышении и понижении полного давления P_0 .

Экспериментальные исследования процесса запуска диффузора с камерой Эйфеля на установке, имеющей сопло с $M_a = 2,72$ и диффузоры трех различных диаметров, подтвердили общие закономерности изменения донного давления и распределения статического давления по стенке канала [1]. Исследованиями Беспалова А.М., Михальченко А.Г. и Серебрякова В.Г. были продолжены работы по выявлению особенностей течения газа в канале при различных значениях P_0 на режимах течения с открытой донной областью, отличающихся значительным положительным градиентом статического давления, вызывающим втекание избыточной массы газа в донную область, и с закрытой донной областью, отличающихся минимизацией донного давления и периодическими локальными возрастаниями статического давления на стенке канала за точкой присоединения струи. В работе [1] отмечено, что нельзя пренебрегать учетом взаимодействия пограничного слоя со скачком уплотнения в области присоединения.

В число этих параметров входят число Маха на срезе сопла и толщина пограничного слоя потока перед отрывом. В работе Губановой О.И. [4] показано, что давление в донной области зависит от толщины пограничного слоя, а исследования Глотова Г.Ф. и Мороза Э.К. [3] показывают, что увеличение относительной толщины пограничного слоя почти в 2 раза не приводит к существенному изменению величины

донного давления. Приведенные в обзоре работы являются частью обширных исследований отрывных течений, нашедших отражение в книге «Основы газовой динамики» [5], монографиях П. Чжена [9, 10], Швеца А.М. и Швеца Т.Н. [11], Гогиша Л.В. и Степанова Г.Ю. [8], Сизова А.М. [6, 7, 15], Шишкова А.А. [12, 13].

Заключение

Экспериментальные исследования отрывных течений с внезапным расширением на стационарных режимах заложили основу построения методик расчета донного давления и донного сопротивления летательных аппаратов, а также послужили базисом дальнейшему исследованию нестационарных режимов и переходных процессов.

Обширные исследования донного давления входят в исследования, выявляющие влияние различных газодинамических и конструктивных параметров установок и стендов.

Список литературы

- Беспалов А.М., Михальченко А.Г., Серебряков В.Г. Исследование процесса запуска диффузора сверхзвуковой аэродинамической трубы с камерой Эйфеля // Ученые записки ЦАГИ. – 1973. – Т. IV, № 2. – С. 125–132.
- Гинзбург И.П. Прикладная гидрогазодинамика. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1958.
- Готов Г.Ф., Мороз Э.К. Исследование осесимметричных течений с внезапным расширением звукового потока // Труды ЦАГИ. – 1970. – Вып. 1281. – С. 31–39.
- Губанова О.И. Использование метода среднemasсовых величин для расчета донного давления и энтальпии: сб. науч. тр. / Струйные и отрывные течения, [под ред. Кириасова Б.С.]. – ГОНТИ. – 1974. – Вып. 3, № 1. – С. 68–83.
- Крокко Л. Одномерное рассмотрение газовой динамики установившихся течений: кн. / Основы газовой динамики; под ред. Г. Эмонса. – М.; ИЛ, 1963. – С. 269–274.
- Сизов А.М. Газодинамика и теплообмен газовых струй в металлургических процессах. – М.: Металлургия, 1987. – С. 256.
- Сизов А.М. Диспергирование расплавов сверхзвуковыми газовыми струями. – М.: Металлургия, 1991. – С. 184.
- Степанов Г.Ю., Гогиш Л.В. Квазиодномерная газодинамика сопел реактивных двигателей. – М.: Машиностроение, 1973. – С. 167.
- Чжен П. Отрывные течения. – М.: Мир, 1972–1973. – Т. 1–3.
- Чжен П. Управление отрывом потока. – М.: Мир.
- Швец А.И., Швец И.Т. Газодинамика ближнего следа. Киев: Наукова думка, 1976. – С. 384.
- Шишков А.А. Газодинамика пороховых ракетных двигателей. – М.: Машиностроение, 1968. – С. 148.
- Шишков А.А., Силин Б.М. Высотные испытания реактивных двигателей. – М.: Машиностроение, 1985. – С. 208.
- Эгинк Х. Улучшение восстановления давления в сверхзвуковых аэродинамических трубах. – М.: Механика, 1955. – №5.
- Явойский А.В., Явойский В.Л., Сизов А.М. Применение пульсирующего дутья при производстве стали. – М.: Металлургия, 1985. – С. 176.
- 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 c 268.
- Chapman D.R. An analysis of base pressure at supersonic velocities and comparison with experiment // NASA. – Tech. Note 2137. – July 1950.
- Chow W.L. On the base pressure resulting from the interaction of a supersonic external stream with a sonic or subsonic jet // J. Ae. Sci. – 1959. – Vol. 26. – P. 176.
- Fabri J., Siestrunk R. Supersonic air ejectors // Advances in applied mechanics. – New York: Academic Press Ins., 1958. – c ol. 5.
- Jungowski W.M. On the flow in a sudden enlargement of a duct // Fluid Dynamics Transactions. – 1969. – Vol. 4. – P. 231–241.
- Jungowski W.M. On the pressure oscillating in a sudden enlargement of a duct section // Fluid Dynamics Transaction. – 1967. – №1. – P. 735–741.
- Karashima K. Base pressure on two-dimensional blunt-trailing-edge wings at supersonic velocity // University of Tokyo, Aero, Research Institute Report 368. – October 1961.
- Korst H.H. A theory for base pressure in transonic and supersonic flow // Trans ASME, Journal of applied Mechanics. – 1956. – Vol. 23, №4. – P. 593–600.
- Lukasiewicz J. Diffusers for supersonic wind tunnels // J. aero Sci. – 1953. – 20(№9). – P. 585.
- Martin B.W., Baker P.J. Experiments on a supersonic parallel diffuser // J. Mech. Engng Sci. – 1963. – №5. – С. 98–113.
- Neumann E.P., Lustwerk F. High efficiency supersonic diffusers // J. aero Sci. – 1951, 18(№6). – P. 369.
- Neumann E.P., Lustwerk F. Supersonic diffusers for wind tunnels // J. appl. Mech. – 1949. – 16(№2). – P. 195.
- 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.

Рецензенты:

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

Матвеев С.К., д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой гидроаэромеханики, математико-механический факультет 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 01.08.2011.