



Dedicated to the memory of academician Yu.A. Ryzhov

**PROCEEDINGS
OF THE XII INTERNATIONAL CONFERENCE
ON APPLIED MATHEMATICS AND MECHANICS
IN AEROSPACE INDUSTRY**



**24–31 May, 2018
Alushta, Crimea**



УДК 519.6:517.958:533.6
ББК 27.5.14.4
М34

Издание осуществлено при финансовой поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований (проект 18-08-20036)
и Московского авиационного института
(национального исследовательского университета)

М34 **Материалы XII Международной конференции по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (NPNJ'2018), 24–31 мая 2018 г., Алушта.** — М.: Изд-во МАИ, 2018. — 768 с.: ил.

ISBN 978-5-4316-0491-1

Сборник включает в себя научные работы, отражающие современные достижения в газовой динамике струй и сопел, механике многофазных сред, плазменной аэродинамике, аэрокосмической механике, механике деформируемого твердого тела, прочности, разрушении и безопасности конструкций, а также в ряде смежных областей.

Для специалистов в области прикладной математики и механики, математического моделирования, информационных технологий, аспирантов и студентов старших курсов технических вузов.

Материалы XII Международной конференции по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (NPNJ'2018), Алушта

Дизайн и компьютерная верстка *Ал. А. Пярнпуу*

Подписано в печать 24.04.18. Формат 70 × 100 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 62,4.
Тираж 350 экз. Изд. №613. Заказ №25/04/25-2121

Издательство МАИ
(МАИ), Волоколамское ш., д. 4, Москва, А-80, ГСП-3 125993

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии ООО «Компания АРТИШОК»,
125362, Москва, ул. Свободы, д. 35, стр. 3, e-mail: info@artishok.ru

ISBN 978-5-4316-0491-1

© Московский авиационный институт
(национальный исследовательский
университет), 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

Секция А

Неравновесные процессы в соплах и струях

Абашев В.М., Еремкин И.В., Животов Н.П., Замураев В.П., Калинина А.П., Третьяков П.К., Тупикин А.В. Структура сверхзвукового потока в полузакрытых каналах при втекании сфокусированных струй	21
Абдрашитов А.А., Марфин Е.А., Кадыйров А.И. Вихревые структуры в струйном акустическом резонаторе	23
Бабаков А.В., Белошицкий А.В., Гайдаенко В.И., Дядькин А.А. Численное моделирование течения в диффузорной части регулируемых сопел	25
Борзенко Е.И., Шрагер Г.Р. Формирование свободной поверхности при заполнении трубы вязкой жидкостью с учетом поверхностного натяжения	27
Борисенко И.В., Гришин Ю.А. Расчетная доводка проточной части охладителя наддувочного воздуха двигателя гоночного автомобиля	29
Бырдин К.А., Макаренко В.С. Влияние конфигурации и расположения форсунок инжекции на эффективность работы органов управления вектором тяги ракетного двигателя, реализующих вдув газа в сверхзвуковую часть сопла	32
Воротилин В.П. О механизме переноса импульса в турбулентных струях	34
Гайсин Ал.Ф., Галимзянов И.И., Гайсин Аз.Ф., Гайсин Ф.М., Багаутдинова Л.Н., Марданов Р.Р., Мухаметов Р.А., Фахрутдинова И.Т., Шакирова Э.Ф. Шлирен-изображения взаимодействующих струйных течений жидкости в парогазовом разряде постоянного тока	36
Глазунов А.А., Кагенов А.М., Еремин И.В., Костюшин К.В. Численное исследование натекания одиночной сверхзвуковой струи на плоскую преграду	38
Дроздов С.М., Федоров Д.С., Чистов Ю.И., Чудаков А.Я. Численное моделирование течения в тракте перспективной дозвуковой аэродинамической трубы с закрытой рабочей частью при отсутствии и наличии щелевой перфорации	40
Дроздов С.М., Федоров Д.С., Чистов Ю.И., Чудаков А.Я. Численное моделирование течения в тракте перспективной дозвуковой аэродинамической трубы с открытой рабочей частью при влиянии стенок акустической камеры	42
Дьяченко Н.В. Распределение капель воды по высоте над уровнем моря в облаке, окружающем судно на воздушной подушке	44
Завершинский И.П., Климов А.И., Кнестяпин В.Н., Курушина С.Е., Молевич Н.Е., Порфирьев Д.П. Исследование структуры вихревого потока в разрядной трубке	46
Замураев В.П., Калинина А.П., Амельчукова В.Ю., Попова Д.С., Федорова Д.В. Моделирование турбулентного сверхзвукового истечения из полузакрытого канала со сфокусированными струями	47
Зарвин А.Е., Художитков В.Э., Каляда В.В. Изменение режимов конденсации в сверхзвуковых струях метана при добавлении одноатомных газов-носителей	48
Зубарев В.М. Влияние неблагоприятного градиента давления на течение в пограничном слое диффузора	51
Котов М.А., Рулева Л.Б., Солодовников С.И. Сравнение газодинамических течений в гиперзвуковой ударной аэродинамической трубе по двум конфигурациям сопел	53
Крупнов А.А., Погосбекян М.Ю., Сергиевская А.Л., Смехов Г.Д. Анализ урвневых моделей применительно к диссоциации и обмену на основе траекторных расчетов	55

Число Рейнольдса, вычисленное по параметрам и диаметру критического сечения, составляет $Re = 2 \cdot 10^6$.

Численные исследования осуществлялись на основе реализованных на вычислительном комплексе кластерной архитектуры параллельных алгоритмов [2] консервативного метода потоков. Использовались вычислительные сетки, состоящие из $6 \cdot 10^6$ конечных объемов, с экспоненциальным сгущением к стенкам сопла.

Ниже приводятся результаты расчетов течения в соплах 1, 2 для различных значений параметра n , равному отношению полного давления в критическом сечении к атмосферному, и относительной площади критического сечения сопла $\bar{s}_z^* = s_z^*/s_0^*$. s_z^* — площадь критического сечения сопла при наличии заслонки. Проведенные расчеты указывают на наличие отрыва потока на внутренней поверхности сопла. Как для круглого, так и для прямоугольного критических сечений для значений $n = 80; 60; 40$ линия отрыва находится в пределах среза сопла. При $n = 20$ линии отрыва находятся между критическим сечением и началом среза сопла. До линии отрыва на внутренней поверхности сопла рассчитанные отношения давления p/p_0 практически не зависят от величины n . Влияние формы критического сечения номинального сопла на неравномерность течения можно проследить на рис. 2, где для разных положений заслонки представлены зависимости отношения p/p_0 от θ в двух сечениях $x = 3,1$ (кривые 1, 2), и $x = 6,42$ (кривые 3, 4), проходящем через начало среза сопла. Сплошные линии соответствуют соплу 1, а пунктирные линии 2, 4 — соплу 2 ($a - \bar{s}_z^* = 1; b - \bar{s}_z^* = 0,8$).

На рис. 3 приведены зависимости относительных сил $\bar{F}_y = F_y/I^*$ и $\bar{F}_z = F_z/I^*$ от \bar{s}_z^* для $n = 60$ (F_y, F_z — составляющие суммарной газодинамической силы, действующие на внутреннюю поверхность сопла). Кривые 1 относятся к соплу 1, кривые 2 — к соплу 2. Пунктирной линией 3 показан коэффициент y -составляющей газодинамической силы $\bar{F}_{ay} = F_{ay}/I^*$, где F_{ay} — y -составляющая газодинамической силы, действующей на внутреннюю диффузорную часть сопла при условии постоянства давления внутри сопла, равного атмосферному p_a ; I^* — импульс потока в критическом сечении. По положению сплошных кривых относительно пунктирных на рис. 3 и по знаку кривых на рис. 4 можно судить о том, в какую сторону отклоняется вытекающая из сопла струя.

1. Антонова Н. П., Брюханов Н. А., Четкин С. В. Средства посадки пилотируемого транспортного корабля нового поколения // Космическая техника и технологии. — 2014. — №4(7). — С. 21–30.
2. Бабаков А. В. Численное моделирование пространственно-нестационарных струй сжимаемого газа на многопроцессорном вычислительном комплексе // Ж. Вычисл. матем. и Матем. физ. — 2011. — Т. 51, №2. — С. 251–260.

ФОРМИРОВАНИЕ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ЗАПОЛНЕНИИ ТРУБЫ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТЬЮ С УЧЕТОМ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ*

Е. И. Борзенко, Г. Р. Шрагер

ТГУ, Томск, Россия

Исследуется процесс заполнения вертикальной трубы вязкой несжимаемой жидкостью с учетом сил поверхностного натяжения. Предполагается, что течение осесимметричное, и заполнение осуществляется против силы тяжести. Область

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ (МК-3085.2018.1).

решения схематично изображена на рис. 1, а. Математическая постановка задачи включает уравнения Навье–Стокса и неразрывности, записанные в безразмерных переменных

$$\text{Re} \frac{d\mathbf{u}}{dt} = -\nabla p + \Delta \mathbf{u} + \mathbf{W}, \quad \nabla \cdot \mathbf{u} = 0.$$

Здесь \mathbf{u} — вектор скорости, t — время, p — давление, $\mathbf{W} = (0, -W)$, $\text{Re} = \rho UR/\mu$ — число Рейнольдса, $W = \rho g R^2/(\mu U)$ — параметр, характеризующий соотношение гравитационных и вязких сил, ρ — плотность жидкости, μ — вязкость, g — ускорение свободного падения, R — радиус трубы, U — среднерасходная скорость во входном сечении Γ_2 .

На свободной поверхности Γ_1 граничные условия заключаются в отсутствии касательного напряжения и равенстве нормального сумме внешнего и капиллярного давлений. Внешнее давление без ограничения общности можно считать нулевым.

Во входном сечении Γ_2 задается параболический профиль скорости. На стене Γ_3 выполняется условие прилипания, на оси симметрии Γ_4 — условия симметрии. Таким образом граничные условия запишутся в виде

$$\Gamma_1: \frac{\partial u_n}{\partial s} + \frac{\partial u_s}{\partial n} = 0, \quad -p + 2\frac{\partial u_n}{\partial n} = -\frac{K}{\text{Ca}},$$

$$\Gamma_2: u_r = 0, \quad u_z = 2(1 - r^2),$$

$$\Gamma_3: u_r = 0, \quad u_z = 0,$$

$$\Gamma_4: u_r = 0, \quad \frac{\partial u_z}{\partial r} = 0,$$

где u_n , u_s — нормальная и касательная составляющая вектора скорости на Γ_1 , $\text{Ca} = \mu U/\sigma$ — капиллярное число, K — сумма главных кривизн Γ_1 , σ — коэффициент поверхностного натяжения.

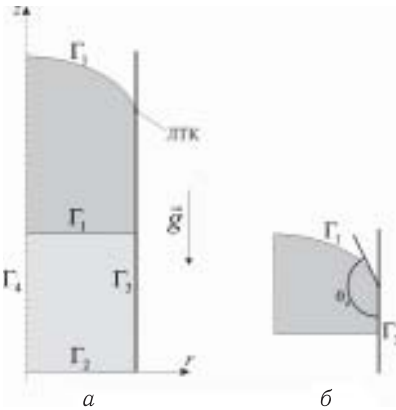


Рис. 1. Область течения

Движение свободной поверхности осуществляется в соответствии с кинематическим условием

$$\frac{dr}{dt} = u_r, \quad \frac{dz}{dt} = u_z.$$

Для определения скорости движения линии трехфазного контакта (ЛТК) используется закон Хоффмана, который связывает эмпирической функциональной зависимостью значения динамического краевого угла θ_d , равновесного краевого угла θ_s и капиллярного числа [1]

$$\frac{\cos \theta_s - \cos \theta_d}{\cos \theta_s + 1} = \text{tang}(4,96(\text{Ca} u_{cl})^{0,702}),$$

где u_{cl} — безразмерная скорость контактной линии.

Численное решение задачи основано на совместном использовании метода контрольного объема и алгоритма SIMPLE [2] для вычисления полей скорости и давления во внутренней области и метода инвариантов [3] для удовлетворения естественных граничных условий на свободной поверхности. Свободная граница представляется в виде упорядоченного набора частиц-маркеров, равномерно расположенных вдоль нее. Для определения суммы главных кривизн свободной поверхности, она предварительно сглаживается с помощью интерполяционного сплайна.

Аппроксимационная сходимость вычислительного алгоритма подтверждается расчетами на последовательности сеток. Параметрические расчеты показывают, что с течением времени первоначально плоская свободная поверхность приобретает установившуюся форму, которая перемещается вдоль трубы со среднерасходной скоростью. Влияние определяющих параметров на форму свободной поверхности показано на рис. 2.

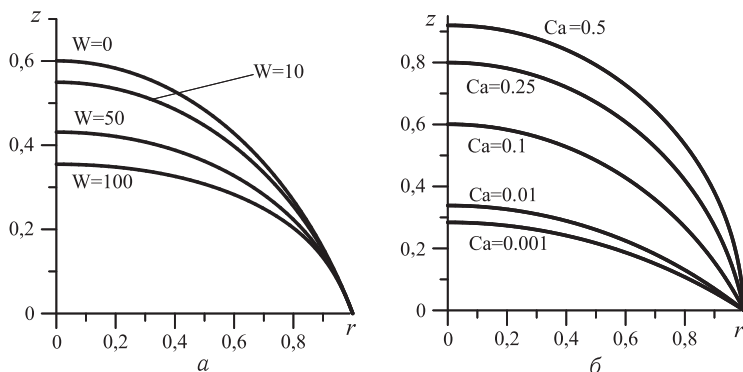


Рис. 2. Установившиеся формы свободной поверхности ($Re = 0,01$, $\theta_s = 120$: а — $Ca = 0,1$; б — $W = 0$)

Видно, что с увеличением гравитационных сил (рост W) форма становится более пологой, а динамический краевой угол сохраняется. Усиление капиллярных эффектов (уменьшение Ca) приводит к уменьшению площади поверхности, при этом форма стремится к сферической, а динамический угол — к равновесному.

1. Jiang T. S., Oh S. G., Slattery J. C. Correlation for Dynamic Contact Angle // Journal of Colloid and Interface Science. — 1979. — V. 69. — I. 1. — P. 74–77.
2. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и механики жидкости / Пер. с англ. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 152 с.
3. Васенин И. М., Нефедов А. П., Шрагер Г. Р. Метод расчета течений вязкой жидкости со свободной поверхностью // Численные методы механики сплошной среды. — 1985. — Т. 16, №6. — С. 29–43.

РАСЧЕТНАЯ ДОВОДКА ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ОХЛАДИТЕЛЯ НАДУВОЧНОГО ВОЗДУХА ДВИГАТЕЛЯ ГОНОЧНОГО АВТОМОБИЛЯ

И. В. Борисенко, Ю. А. Гришин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

В МГТУ им. Баумана активно развивается программа создания гоночного автомобиля-болида «Формула студент» для международных спортивных соревнований. С целью дальнейшего повышения его скоростных характеристик применяется турбонаддув двигателя с охладителем надувочного воздуха (ОНВ) типа «воздух–воздух». ОНВ позволяет значительно увеличить плотность заряда, поступающего в цилиндр, и, как следствие, обеспечить дополнительную форсировку двигателя по мощности. Проточная часть охладителя имеет сложную конфигурацию, и в ней имеют место заметные газодинамические потери. В представленной работе выполнено численное исследование пространственного течения в ОНВ, направлен-