



*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

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

<b>Царапкин Р.А., Иванов В.Н., Бирюков В.И.</b> Методика прогнозирования высоко- частотной неустойчивости горения в камерах ЖРД тягой более 4кН . . . . .	152
<b>Чернов А.А., Шмаков А.Г., Маркович Д.М., Дулин В.М., Торопецкий К.В., Чернов Г.А.</b> Программно-аппаратный комплекс для калибровки численных моделей горения в жаровых камерах авиадвигателей . . . . .	154
<b>Черпакова А.А., Микушкин А.Ю., Головастов С.В., Бивол Г.Ю.</b> Характеристики стационарной детонационной волны в водородно-кислородных смесях в детонационной трубке субкритического сечения . . . . .	156
<b>Яцухно Д.С.</b> Аэродинамика волнолетов, построенных на скачках уплотнения различ- ной формы . . . . .	157

## Секция С

**Многофазные течения и процессы тепломассообмена**

<b>Алабужев А.А.</b> Нелинейные трансляционные колебания сжатой капли . . . . .	160
<b>Алабужев А.А., Кашина М.А.</b> Влияние неоднородности поверхности на собственные колебания цилиндрического пузырька . . . . .	162
<b>Алексин В.А.</b> Влияние параметров тепломассообмена на поверхности на нестацио- нарное турбулентное течение . . . . .	163
<b>Антюхов И.В.</b> Исследование теплообмена при взаимодействии высокоскоростной газо- капельной струи с нагретой поверхностью . . . . .	165
<b>Базилевский А.В., Рожков А.Н.</b> Всплески воды с добавками высокомолекулярного полимера . . . . .	167
<b>Борзенко Е.И., Фролов О.Ю., Шрагер Г.Р.</b> Заполнение круглой трубы вязкопластич- ной жидкостью . . . . .	170
<b>Бошенятов Б.В.</b> Парадоксы присоединенной массы в дисперсных средах повышенной концентрации . . . . .	172
<b>Бураго Н.Г., Пунтус А.А., Федюшкин А.И.</b> Влияние вращения на распределение при- меси при выращивании кристаллов методом Бриджмена с погруженным нагревателем Глотов В.Ю., Канаев А.А. Моделирование струйных течений в многокомпонентных средах под защитной оболочкой с помощью методики КАБАРЕ . . . . .	175
<b>Губайдуллин Д.А.</b> Особенности распространения волн в газок капельных и пузырько- вых средах . . . . .	177
<b>Губайдуллин Д.А., Гафиятов Р.Н.</b> Взаимодействие акустических волн со средой, содержащей слой многофракционной жидкости с пузырьками . . . . .	178
<b>Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Г., Ткаченко Л.А.</b> Осаждение аэрозоля в трубах при колебаниях в режиме перехода к ударным волнам . . . . .	180
<b>Губайдуллин Д.А., Никифоров А.А.</b> Динамика акустических волн в вязкоупругих пузырьковых средах . . . . .	182
<b>Губайдуллин Д.А., Терегулова Е.А.</b> Отражение и прохождение акустических волн от границы раздела монодисперсной и многофракционной газозвесей . . . . .	184
<b>Губайдуллин Д.А., Федоров Ю.В.</b> Отражение акустической волны от границы трех- фазной смеси . . . . .	186
<b>Губайдуллин Д.А., Федоров Ю.В., Зарипов Р.Р.</b> Отражение акустической волны от границы тумана . . . . .	187
<b>Даничев В.В., Загуменный М.Н., Смирнов Л.П., Федюшкин А.И., Устинов В.С.</b> Численное моделирование кипения недогретой жидкости . . . . .	189
<b>Жданова А.О., Стрижак П.А., Кузнецов Г.В., Хасанов И.Р.</b> Трансформация жид- костных снарядов при движении через высокотемпературные продукты сгорания, со- ответствующие условиям лесных пожаров . . . . .	191
<b>Засухина Е.С., Засухин С.В.</b> Определение гидрофизических параметров модели влаго- переноса в почве . . . . .	194
	195

1. Базилевский А. В., Рожков А. Н. Всплески воды с добавками поверхностно-активных веществ // Материалы XX Юбилейной Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2017), 24–31 мая 2017 г., Алушта. — М.: Изд-во МАИ, 2017. — С. 374–377.
2. Рожков А. Н. Динамика и разрушение упруговязких жидкостей (обзор) // Известия РАН. МЖГ. — 2005. — № 6. — С. 3–24.

## ЗАПОЛНЕНИЕ КРУГЛОЙ ТРУБЫ ВЯЗКОПЛАСТИЧНОЙ ЖИДКОСТЬЮ\*

*Е. И. Борзенко, О. Ю. Фролов, Г. Р. Шрагер*

*ТГУ, Томск, Россия*

Рассматривается заполнение вертикальной круглой трубы несжимаемой жидкостью Шведова–Бингама, направление движения жидкости противоположно направлению силы тяжести. Течение описывается уравнениями движения и неразрывности, которые в безразмерных переменных имеют вид

$$\operatorname{Re} \frac{d\mathbf{V}}{dt} = -\nabla p + \nabla \cdot (2B\mathbf{E}) + \mathbf{W},$$

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0.$$

Система уравнений замыкается реологическим уравнением Шведова–Бингама, эффективная вязкость в котором определяется выражением  $B = (B_0 + A)/A$ . Здесь  $\mathbf{V}$  — вектор скорости;  $p$  — давление;  $t$  — время;  $B$  — эффективная вязкость;  $\mathbf{E}$  — тензор скоростей деформаций с компонентами  $e_{ij}$ ;  $A = (2e_{ij}e_{ji})^{0.5}$  — интенсивность тензора скоростей деформаций;  $\mathbf{W} = \{0, -W\}$  — вектор;  $\operatorname{Re} = \rho VL/\mu_0$  — число Рейнольдса;  $W = \rho g L^2/(\mu_0 V)$  — параметр, характеризующий отношение гравитационных и вязких сил в потоке;  $B_0 = \tau_0 L/(\mu_0 V)$  — число Бингама;  $\mu_0$  — параметр реологического закона [Па·с];  $\tau_0$  — параметр реологического закона [Па];  $g$  — ускорение силы тяжести [м/с<sup>2</sup>];  $\rho$  — плотность жидкости [кг/м<sup>3</sup>]. В качестве масштабов обезразмеривания выбраны следующие величины: длины — радиус трубы  $L$ ; скорости — среднерасходная скорость во входном сечении  $V$ ; давления — величина  $\mu_0 V/L$ .

В начальный момент времени труба частично заполнена жидкостью, а свободная поверхность имеет плоскую горизонтальную форму. На входе в трубу задается профиль аксиальной скорости, характерный для установившегося течения жидкости Шведова–Бингама в трубе, радиальная скорость равна нулю. На твердой стенке выполняется условие прилипания, на линии симметрии используются условия симметрии. На свободной поверхности выполняются условия равенства нулю касательного напряжения и равенство нормального напряжения внешнему давлению, которое без ограничения общности можно считать равным нулю. Силы поверхностного натяжения не учитываются. Кроме этого, свободная граница подчиняется кинематическому условию.

Для решения поставленной задачи используется конечно-разностный метод, в основе которого лежит алгоритм SIMPLE [1] для расчета полей скорости и давления. Метод инвариантов [2] применяется для удовлетворения граничных условий на свободной поверхности, которая представляется в виде равномерно распределенных частиц-маркеров. Движение маркеров свободной поверхности, за исключением

\*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ (МК-710.2017.1) и РФФИ (проект № 18-08-00412 А).

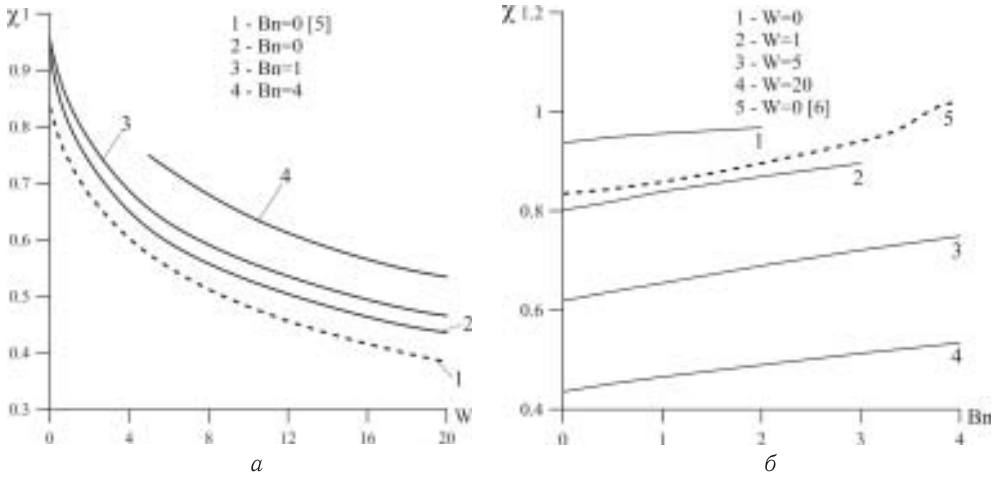


Рис. 1. Зависимости параметра  $\chi$  от  $W$  (а) и от  $Bn$  (б)

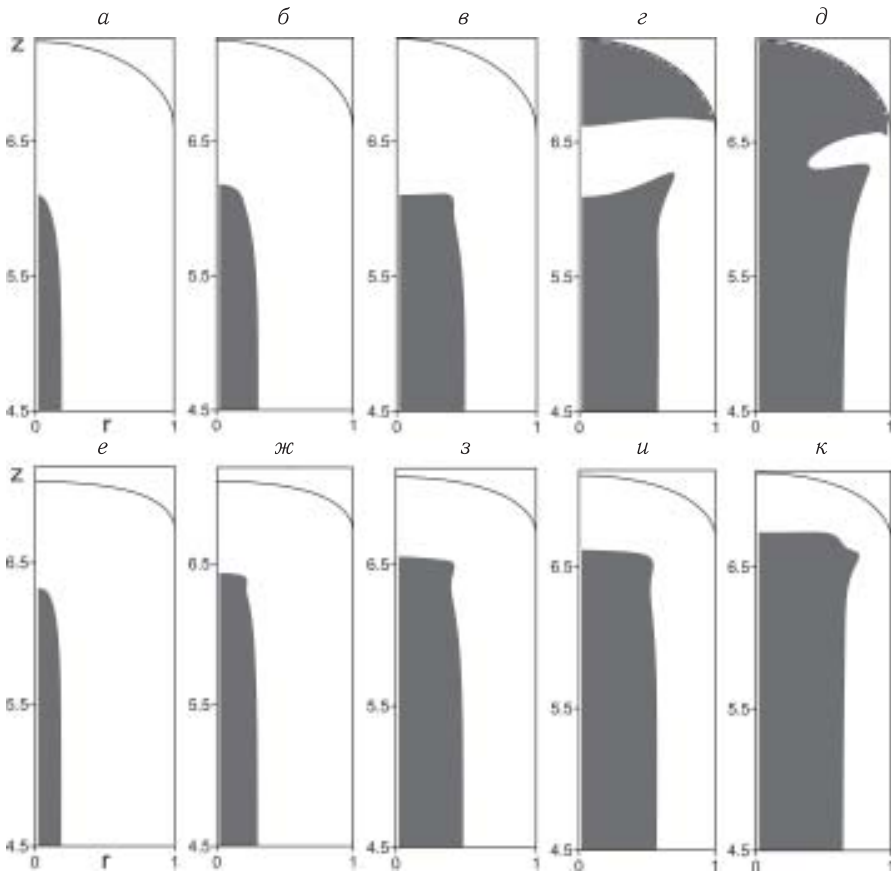


Рис. 2. Структура потока вязкопластичной жидкости при  $W = 5$  (а-д) и  $W = 60$  (е-к):  
а, е -  $Bn = 1$ ; б, ж -  $Bn = 2$ ; в, з -  $Bn = 5$ ; г, и -  $Bn = 8$ ; д, к -  $Bn = 12$

маркера на стенке, осуществляется в соответствии с разностными аналогами кинематического условия. Движение контактной точки жидкость — твердая стенка — газ реализуется с учетом скольжения и значения динамического краевого угла равного  $\pi$  [3]. Для обеспечения сквозного счета характеристик потока, включая зоны квазитвердого движения, при определении вязкости используется метод регуляризации [4]. В качестве условия выделения зон квазитвердого движения используется неравенство  $BA \leq W_p$ , которое является безразмерным аналогом условия выделения областей течения с уровнем напряжений меньшим предела текучести.

Были проведены параметрические исследования процесса заполнения круглой трубы вязкопластичной жидкостью при изменении параметров  $W_p$  и  $W$ . В качестве характеристики формы свободной границы используется безразмерный параметр  $\chi$ , показывающий местоположение вершины потока на линии симметрии относительно точки на линии трехфазного контакта [5]. Характер влияния параметра пластичности  $W_p$  на зависимость  $\chi(W)$  показан на рис. 1, а, пунктирная линия — результаты расчетов для ньютоновской жидкости из [5]. Зависимости  $\chi(W_p)$  при заданных значениях  $W$  представлены на рис. 1, б, пунктирная линия — данные [6].

Характерной особенностью течения вязкопластичной жидкости является наличие квазитвердых ядер в потоке. На рис. 2 продемонстрированы характерные структуры течения. Квазитвердые ядра выделены серым цветом, неокрашенные области течения показывают зоны вязкого течения. При фиксированном параметре  $W$  с ростом числа Бингама ширина зоны квазитвердого движения растет. При  $W = 5$  структуру течения можно разделить на три вида — с одним квазитвердым ядром на достаточном удалении от свободной поверхности, двумя ядрами в окрестности свободной границы и вдали от нее, с объединенным квазитвердым ядром.

1. Patankar S. V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. — New York.: Taylor & Francis, 1980. — 214 p.
2. Васенин И. М., Сидонский О. Б., Шрагер Г. Р. Численное решение задачи о движении вязкой жидкости со свободной поверхностью // Доклады АН СССР. — 1974. — Т. 217, № 2. — С. 295–298.
3. Borzenko E. I., Shragger G. R. Effect of the type of boundary conditions on the three-phase contact line on the flow characteristics during filling of the channel // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. — 2015. — V. 56, I. 2. — P. 167–176.
4. Frigaard I. A., Nouar C. On the usage of viscosity regularization methods for visco-plastic fluid flow computation // J. Non-Newtonian fluid mech. — 2005. — V. 127, I. 1. — P. 1–26.
5. Mitsoulis E. Fountain flow revisited: The effect of various fluid mechanics parameters // AIChE J. — 2010. — V. 56, I. 5. — P. 1147–1162.
6. Mitsoulis E. Fountain flow of pseudoplastic and viscoplastic fluids // J. of Non-Newtonian Fluid Mech. — 2010. — V. 165, I. 1. — P. 45–55.

## ПАРАДОКСЫ ПРИСОЕДИНЕННОЙ МАССЫ В ДИСПЕРСНЫХ СРЕДАХ ПОВЫШЕННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ

**Б. В. Бошнятов**

*ИПриМ РАН, Москва, Россия*

Развитие теоретических моделей описания двухфазных сред с повышенной концентрацией, а также методов расчета их осредненных характеристик, таких как вязкость, теплопроводность, коэффициенты сопротивления, присоединенная масса и др. является одним из важнейших условий повышения эффективности техно-