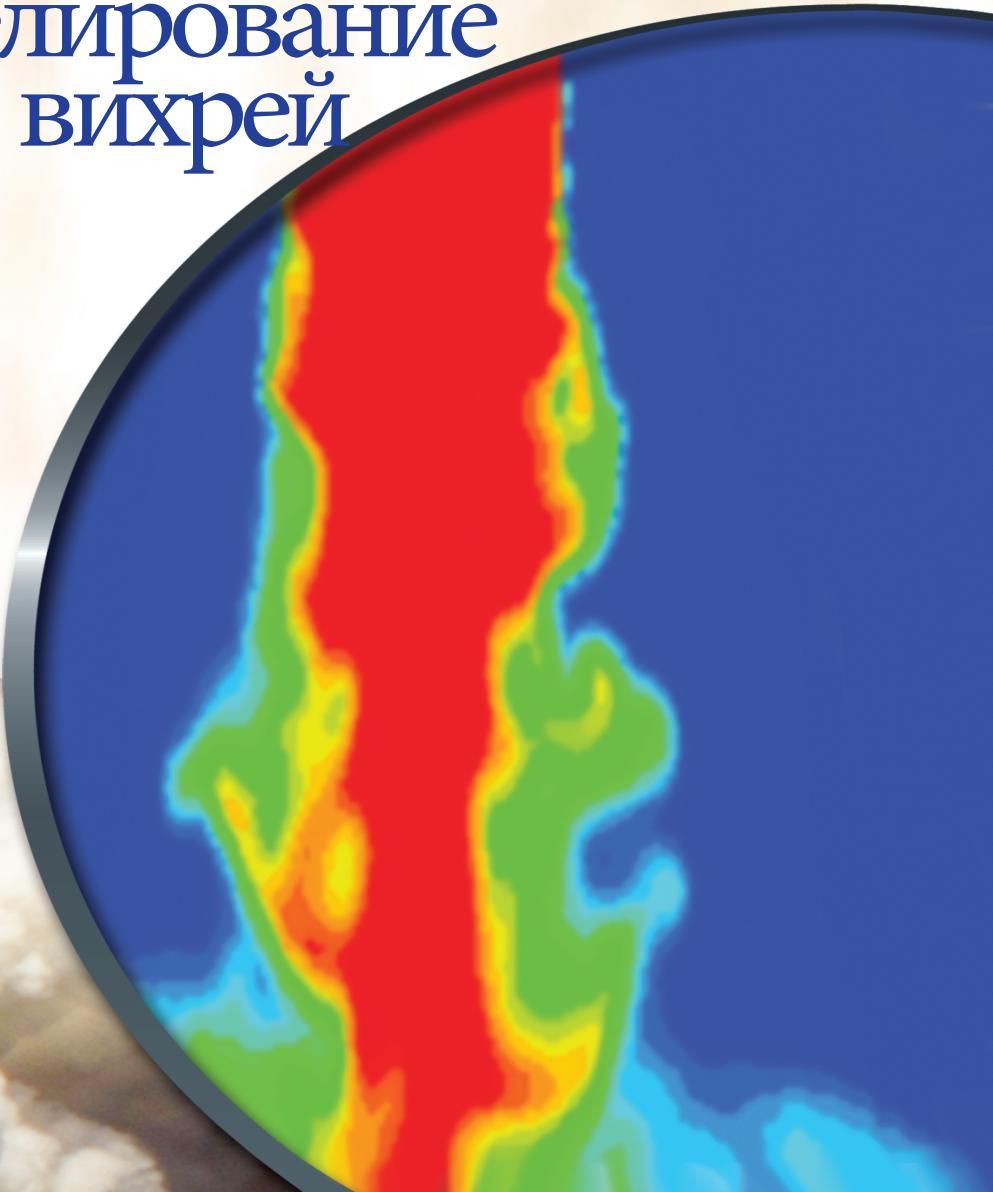




К.Н. Волков, В.Н. Емельянов, В.А. Зазимко

Турбулентные струи— статистические модели и моделирование крупных вихрей



К.Н. Волков, В.Н. Емельянов, В.А. Зазимко

Турбулентные струи- статистические модели и моделирование крупных вихрей



МОСКВА
ФИЗМАТЛИТ®
2013

УДК 532.529

ББК 22.253

В 67

Волков К.Н., Емельянов В.Н., Зазимко В.А. **Турбулентные струи — статистические модели и моделирование крупных вихрей.** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. — 360 с. — ISBN 978-5-9221-1526-1.

Обобщается опыт моделирования турбулентных струйных течений на основе подходов различной степени сложности: статистические модели, основанные на представлении о переносе квазичастицами комплексов газодинамических параметров в заданную точку пространства зоны турбулентного смешения струи с окружающей средой; модели, основанные на решении осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса; современные подходы к моделированию турбулентных течений, такие как моделирование крупных вихрей. Разработанные модели позволяют путем проведения вычислительного эксперимента оптимизировать процессы переноса и горения в турбулентных струях, синтезировать струйные течения, обладающие заданными свойствами, а также дать практические рекомендации по организации струйных течений в технических и технологических приложениях.

Монография предназначена научным работникам, специализирующимся в области вычислительной газодинамики струйных течений, инженерно-техническим работникам, занимающимся проектированием устройств и процессов, ориентированных на струйные технологии, а также аспирантам и магистрантам соответствующих направлений подготовки.

© ФИЗМАТЛИТ, 2014

© К. Н. Волков, В. Н. Емельянов,
В. А. Зазимко, 2014

ISBN 978-5-9221-1526-1

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	6
Основные обозначения	10
Введение	13
Глава 1. Характеристики и методы моделирования турбулентных струйных течений	26
1.1. Классификация струйных течений	27
1.2. Структура турбулентной струи.	28
1.2.1. Условия истечения (28). 1.2.2. Дозвуковая струя (29). 1.2.3. Сверхзвуковая струя (34). 1.2.4. Блочная струя (41).	
1.3. Методы расчета турбулентных струй.	42
1.3.1. Интегральные методы (42). 1.3.2. Полузэмпирические модели (47). 1.3.3. Статистические модели (57). 1.3.4. Способы осреднения газодинамических параметров в струях с переменной плотностью (59).	
1.4. Современные методы расчета струйных турбулентных течений	62
1.4.1. Обзор методов (62). 1.4.2. Решение осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса (66). 1.4.3. Прямое численное моделирование (72). 1.4.4. Моделирование крупных вихрей (73).	
1.5. Модификация моделей турбулентности для расчетов струйных течений.	81
1.5.1. Учет различных факторов (81). 1.5.2. Учет сжимаемости (82). 1.5.3. Учет неравновесности (85). 1.5.4. Кривизна линий тока и вращение (87). 1.5.5. Обеспечение положительности (89). 1.5.6. Обеспечение реализуемости (90).	
1.6. Моделирование крупных вихрей турбулентных струйных течений	91
1.6.1. Физические эффекты (91). 1.6.2. Точность описания (92). 1.6.3. Граничные условия (93). 1.6.4. Выбор подсеточной модели и перенос энергии (96). 1.6.5. Комбинированные подходы (96).	
1.7. Моделирование генерации шума турбулентными струями	97
1.8. Когерентные структуры и виды неустойчивости струйных течений	98
1.8.1. Формирование когерентных структур (99). 1.8.2. Виды неустойчивости (102). 1.8.3. Генерация шума (105). 1.8.4. Самовозбуждение струи (106).	
1.9. Акустические характеристики турбулентных струй	107
1.9.1. Дозвуковые струи (107). 1.9.2. Сверхзвуковые струи (109). 1.9.3. Звуковое облучение (111).	
1.10. Управление турбулентными струями	113
1.10.1. Методы управления (113). 1.10.2. Акустическое воздействие (114).	

Г л а в а 2. Применение статистических моделей для описания турбулентных струйных течений	117
2.1. Модель струи, истекающей из сопел различной конфигурации	118
2.1.1. Особенности модели (118). 2.1.2. Формулировка модели (119). 2.1.3. Расчет математических ожиданий и среднеквадратичных отклонений газодинамических комплексов (122).	
2.1.4. Расчетные соотношения для струй, истекающих из сопел различной конфигурации (124). 2.1.5. Связь обобщенных и физических координат (134). 2.1.6. Определение параметров по заданным математическим ожиданиям газодинамических комплексов (140). 2.1.7. Алгоритм расчета струй несжимаемой жидкости (144). 2.1.8. Результаты расчетов (145).	
2.2. Термодинамические характеристики смеси газов при заданных параметрах состояния	146
2.2.1. Термодинамические свойства смеси (146). 2.2.2. Уравнения химического равновесия (147). 2.2.3. Замороженное смешение (150). 2.2.4. Равновесное смешение (152).	
2.3. Математические ожидания газодинамических параметров в струе сжимаемого газа	155
2.3.1. Основные допущения (155). 2.3.2. Замороженное смешение (155). 2.3.3. Равновесное смешение (157). 2.3.4. Результаты расчетов (159).	
2.4. Результаты расчетов одиночных и блочных до- и сверхзвуковых струй	160
2.4.1. Одиночные струи (161). 2.4.2. Блочные струи (174).	
2.5. Результаты расчетов одиночной и составной струй различного химического состава	183
2.5.1. Равновесный термодинамический блок (183). 2.5.2. Тестовые расчеты (184). 2.5.3. Блочные сверхзвуковые струи различного химического состав (186).	
2.6. Расчет пульсаций газодинамических параметров в струях с учетом химических реакций	190
2.6.1. Метод расчета (190). 2.6.2. Учет пульсаций газодинамических параметров (195). 2.6.3. Струя с физико-химическими превращениями (199). 2.6.4. Расчеты турбулентных струй (205).	
2.7. Результаты расчетов турбулентных струй с учетом пульсаций газодинамических параметров	209
2.7.1. Струя несжимаемой жидкости, истекающей из прямоугольного сопла (209). 2.7.2. Горящая струя водорода, истекающая в спутный поток (212).	
2.8. Формирование диффузного газового факела заданной конфигурации	217
Г л а в а 3. Моделирование крупных вихрей турбулентных струйных течений	221
3.1. Математическая модель	222
3.1.1. Основные уравнения (222). 3.1.2. Подсеточная модель (224).	
3.1.3. Модель турбулентности (227). 3.1.4. Границные условия (228). 3.1.5. Уравнения движения частицы (229).	

3.2. Методы решения газодинамических и вспомогательных задач	231
3.2.1. Метод конечных объемов (232). 3.2.2. Решение задачи Коши (234).	
3.3. Применение модели турбулентности для описания изобарической струи	236
3.3.1. Основные уравнения (236). 3.3.2. Преобразование координат (238). 3.3.3. Сетка и численный метод (240).	
3.4. Течение в свободном слое смешения	241
3.4.1. Ширина области перемешивания и характерная скорость (241). 3.4.2. Начальные и граничные условия (243). 3.4.3. Параметры и сетка (244). 3.4.4. Результаты расчетов (246).	
3.5. Турбулентная струя, истекающая в затопленное пространство или спутный поток	251
3.5.1. Начальные и граничные условия (251). 3.5.2. Сетка (253). 3.5.3. Результаты расчетов (253).	
3.6. Течение в свободной неизотермической турбулентной струе	259
3.6.1. Неизотермические струи (259). 3.6.2. Начальные и граничные условия (261). 3.6.3. Результаты расчетов (262).	
3.7. Теплообмен при взаимодействии круглой турбулентной струи с преградой	273
3.7.1. Взаимодействие струи с преградой (273). 3.7.2. Начальные и граничные условия (278). 3.7.3. Параметры и сетка (279). 3.7.4. Результаты расчетов (280).	
3.8. Аэрооптические эффекты в сдвиговых потоках	292
3.8.1. Возникновение оптических аберраций (292). 3.8.2. Дисперсия флуктуаций фазы (294). 3.8.3. Полуэмпирическая модель (296). 3.8.4. Пограничный слой на плоской пластине (298). 3.8.5. Слой смешения (298). 3.8.6. Описание поля течения (300). 3.8.7. Результаты расчетов (301).	
3.9. Рассеивание и теплообмен частиц в неизотермической турбулентной струе	304
3.9.1. Моделирование несущей и дисперсной фаз (305). 3.9.2. Рассеивание частиц (308). 3.9.3. Нагрев, плавление и испарение частицы (314).	
3.10. Взаимодействие лазерного излучения с частицами, ускоряемыми в струе	318
3.10.1. Взаимодействие излучения с частицами (319). 3.10.2. Геометрическая модель (320). 3.10.3. Распространение лазерного излучения (321). 3.10.4. Газовая фаза (323). 3.10.5. Дисперсная фаза (323). 3.10.6. Результаты расчетов (325). 3.10.7. Точное решение (329).	
Заключение	335
Список литературы	340

Предисловие

Струйные течения являются одной из распространенных форм движения жидкости и газа в природе (например, струйные течения в океане или атмосфере) и технике (например, струи, вытекающие из сопел ракетных двигателей, а также струи, встречающиеся в технологиях охлаждения и сушки) и характеризуются широким разнообразием. Точный расчет струйных течений играет важную роль во многих технических и технологических приложениях. Процессы смешения регулируют степень перемешивания газа в камерах сгорания, уровень шума самолетов и распространение загрязнителей в промышленных районах.

Информация о распределениях скорости, температуры, давления и концентрации компонентов в поперечных сечениях струи, расположенных на выбранном расстоянии от среза сопла, и вдоль направления распространения струи требуется для определения силовых и тепловых нагрузок на различные элементы конструкции. Для многих приложений представляется важным расчет акустического поля, возникающего в области распространения струи, а также моделирование аэрооптических эффектов, связанных с искажением фазы и амплитуды светового луча, проходящего через струйный поток.

Для определения зоны безопасного нахождения людей и техники около самолета с работающим двигателем требуется правильное описание распространения выхлопной струи турбореактивного двигателя вдоль поверхности аэродрома. Ужесточение экологических норм по уровню шума самолетов требует точного расчета течения в струях, что необходимого для последующего вычисления акустических параметров и уровня шума в ней. На режиме взлета возможно взаимодействие горячей турбулентной струи с элементами механизации крыла, что вызывает увеличение шума и приводит к механическим повреждениям.

Перспективным направлением применения лазерных систем является их использование в авиационной технике для решения задач навигации при взлете и посадке самолетов, в системах связи, наземных и бортовых устройствах для мониторинга уровня турбулентности, обнаружения и измерения параметров локализованных воздушных потоков, представляющих опасность для летательного аппарата. При проектировании таких систем требуется оценивать их точностные и энергетические характеристики, учитывать влияние помех, в том числе и создаваемых турбулентной струей двигателя. При разработке лазерных систем важную роль играет информация о параметрах лазерных пучков, искаженных турбулентной струей двигателя. Аналитические и численные

модели распространения лазерного излучения в условиях естественной атмосферной турбулентности, подтвержденные многочисленными экспериментальными исследованиями, хорошо известны. В то же время характеристики лазерных пучков, распространяющихся в условиях высокоскоростной и высокотемпературной турбулентной струи изучены в существенно меньшей степени.

К настоящему времени разработано большое количество полуэмпирических и численных методов расчета струйных течений, позволяющих рассчитать ламинарные и турбулентные, дозвуковые и сверхзвуковые (в том числе нерасчетные) струи с учетом двухфазности, химических реакций в слое смешения, неравновесности течения и других процессов. В имеющихся расчетных методах для получения решения широко используются эмпирические законы турбулентного перемешивания, скорости химических реакций, интенсивности излучения, полученные в условиях, не позволяющих считать эти законы универсальными. Несмотря на интенсивное развитие вычислительной техники и успехи, достигнутые в области построения численных методов, разработке соответствующего математического и программного обеспечения, включая параллельные вычислительные технологии, проблема моделирования турбулентных струйных течений остается одной из наиболее сложных и важных проблем механики жидкости и газа и теплофизики.

Тематика монографии связана с разработкой математических моделей и эффективной реализацией вычислительных алгоритмов, предназначенных для моделирования турбулентных струйных течений различного класса (несжимаемые/сжимаемые, одиночные/блочные, течения с физико-химическими превращениями, двухфазные, свободные/стесненные) в технических и технологических приложениях в рамках статистического подхода, основанного на переносе квазичастицами комплексов газодинамических параметров в заданную точку пространства зоны турбулентного смешения струи с окружающей средой, а также современных подходов к моделированию струйных течений (моделирование крупных вихрей) и струйных течений газовзвеси (статистический вариант дискретно-траекторного подхода).

Монография состоит из введения, 3 глав, заключения и списка литературы. Книга разбита на главы, разделы и подразделы. Формулы, рисунки и таблицы нумеруются внутри каждой главы (указывается номер главы и порядковый номер).

В Введении рассматриваются вопросы, связанные с математическим моделированием турбулентных струйных течений жидкости и газа, и обсуждаются некоторые технические и технологические приложения.

В Главе 1 излагаются теория турбулентных струйных течений, а также обсуждаются модели и методы расчета параметров турбулентных струй различного класса (интегральные методы, полуэмпирические модели турбулентности, прямое численное моделирование, моделирование крупных вихрей, моделирование отсоединенных вихрей).

На основе сравнения расчетных и экспериментальных данных выявляются их достоинства и недостатки. Для анализа расчетных методов используются следующие критерии: полнота и достоверность получаемой информации (степень адекватности модели); степень универсальности модели (возможность использования в расчетах различных типов турбулентных струй); универсальность и количество опытных зависимостей, вводимых в модель; простота вычислительной процедуры; наличие и объем информации, получаемой в процессе расчета. В отличие от течений в пограничных слоях и каналах, прямое численное моделирование и моделирование крупных вихрей струйных течений развивается медленнее, а точность таких расчетов остается сравнительно невысокой.

В Главе 2 разрабатываются математические модели одиночных турбулентных струй, блочных (составных) струй одинакового химического состава и блочных струй, образованных одиночными струями с различным химическим составом, истекающих из сопел со сложной конфигурацией выходных сечений. Модели позволяют путем проведения вычислительного эксперимента оптимизировать процессы переноса и горения в турбулентных струях, синтезировать струйные течения, обладающие заданными свойствами, и дать практические рекомендации по организации таких течений в инженерных приложениях. Выбранное название (статистическая модель) является в некотором смысле условным, поскольку все теории турбулентности, описывая поведение случайных полей газодинамических параметров, оперируют их статистическими характеристиками (математические ожидания, среднеквадратичные отклонения, характерные масштабы и другие). Под статистическими понимаются те модели, которые основываются на исследовании свойств и построении плотности вероятности распределений газодинамических параметров в поле течения и плотности вероятности случайных блужданий турбулентных образований (квазичастиц).

В случае одиночных нереагирующих дозвуковых и сверхзвуковых струй результаты расчетов, полученные с применением статистической модели, согласуются с данными физического эксперимента лучше, чем результаты, полученные с использованием современных моделей турбулентности типа $k-\varepsilon$ модели. В случае блочных струй применение статистической модели ограничивается необходимостью привлечения дополнительных экспериментальных данных для определения фактического положения осей струй блока, изгибающихся из-за «слипания» струй, вызванного недостаточной эжекцией воздуха в межсплотовое пространство, следствием чего является пониженное по сравнению с атмосферным давление.

В Главе 3 проводится моделирование крупных вихрей дозвуковых турбулентных свободных изотермических и неизотермических струй, истекающих в затопленное пространство и спутный поток, течений, индуцированных взаимодействием турбулентных струй с препятствиями, рассеивания и теплообмена частиц примеси в неизотермических струях

газа и низкотемпературной плазмы, а также моделирование крупных вихрей аэрооптических эффектов в свободных сдвиговых течениях. Результаты численных расчетов сравниваются с данными физического эксперимента и имеющимися данными, полученными на основе решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса и расчетами по критериальным зависимостям. Проводится сравнение точности и вычислительной эффективности ряда моделей подсеточной вихревой вязкости.

В Заключении формулируются основные выводы и некоторые направления дальнейших исследований. Систематизация и обобщение полученных результатов позволяет выделить ряд проблем, решение которых имеет важное значение для развития методов численного моделирования струйных течений газообразных и жидких сред в инженерных приложениях.

Список литературы дается в конце книги в алфавитном порядке (сначала русскоязычные издания, затем публикации, вышедшие за рубежом на английском языке).

В книге подводятся итоги исследований турбулентных струй, выполненные авторами и их учениками. В книге также нашли отражение достижения отечественных и зарубежных ученых по данной проблеме. Самостоятельный интерес представляет обширная библиография численных исследований турбулентных струйных течений, а также исследований когерентных структур.

Разработки и результаты, приведенные в монографии, были получены авторами в Балтийском государственном техническом университете «Военмех» им. Д.Ф. Устинова (Санкт-Петербург), университете Суррея (University of Surrey, Guildford, United Kingdom) и университете Кингстона (Kingston University, London, United Kingdom). Полученные результаты и программные разработки использованы на кафедре динамики полета и процессов управления (А5) и кафедре плазмогазодинамики и теплотехники (К6) Балтийского государственного технического университета «Военмех» им. Д.Ф. Устинова.

Особую благодарность авторы выражают академику РАН А.М. Липанову за поддержку и постоянное внимание к работе. Стимулирующее влияние на издание книги оказали многочисленные обсуждения на конференциях и семинарах, а также встречи и беседы с нашими коллегами.

Авторы будут благодарны за замечания и уточнения, которые можно присыпать на адрес кафедры плазмогазодинамики и теплотехники Балтийского государственного технического университета (190005, Санкт-Петербург, ул. 1-ая Красноармейская, д. 1) или на электронные адреса k.volkov@kingston.ac.uk, vlademelyanov@gmail.com.

К.Н. Волков, В.Н. Емельянов, В.А. Зазимко

Основные обозначения

Система координат	Координаты	Компоненты скорости
Декартовая	x, y, z	v_x, v_y, v_z или u, v, w
Цилиндрическая	x, r, θ	v_x, v_r, v_θ или u, v, w

Латинские буквы

a	— скорость звука
c	— постоянная
c_p	— теплоемкость при постоянном давлении
d	— диаметр
e	— полная энергия
f	— функция
F	— вектор потока
h	— энталпия
H	— полная энталпия
k	— кинетическая энергия турбулентности
l	— масштаб турбулентности
L	— линейный масштаб
L_i	— газодинамический комплекс ($i = 1, 2, 3$)
m	— параметр спутности
M	— молярная масса
n	— нерасчетность струи
p	— давление
q	— плотность теплового потока
Q	— вектор консервативных переменных
r	— радиус-вектор
R	— газовая постоянная
S	— тензор скоростей деформаций
t	— время
T	— температура
u	— внутренняя энергия
U	— масштаб скорости
v	— вектор скорости
V	— объем

Греческие буквы

α	— коэффициент избытка окислителя
α_i	— обобщенная координата ($i = 1, 2, 3$)

γ	— показатель адиабаты
δ	— толщина пограничного слоя или зоны смешения
Δ	— ширина фильтра
ε	— скорость диссипации кинетической энергии
ζ	— массовая концентрация
θ	— степень турбулентности
ϑ	— степень подогрева
κ	— волновое число
κ	— постоянная Кармана
λ	— теплопроводность
μ	— динамическая вязкость
ν	— кинематическая вязкость
ρ	— плотность
σ	— среднеквадратичное отклонение
τ	— тензор вязких напряжений
ψ	— параметр смешения (весовая доля вещества струи в смеси)
ω	— отношение плотности среды к плотности струи
$\Omega = \nabla \times \mathbf{v}$	— вихрь

Числа подобия

M	— число Маха
Nu	— число Нуссельта
Pr	— число Прандтля
Re	— число Рейнольдса
Ri	— число Ричардсона
Sc	— число Шмидта
St	— число Струхала

Нижние индексы

a	— срез сопла
e	— эффективный
i, j, k	— тензорные индексы
m	— ось струи
s	— подсеточный
t	— турбулентный
w	— стенка
0	— точка торможения
$*$	— критический
∞	— окружающая среда

Верхние индексы

n	— шаг по времени
$+$	— пристеночные параметры

Осреднение и фильтрация

$\bar{\cdot}$	— осреднение по Рейнольдсу
---------------	----------------------------

\sim	— фильтрация с сеточным фильтром
$\hat{\cdot}$	— фильтрация с тестовым фильтром
$\langle \rangle$	— осреднение по ансамблю реализаций

Сокращения

CM	— Статистическая Модель
CFD	— Computational Fluid Dynamics
DES	— Detached Eddy Simulation
DNS	— Direct Numerical Simulation
LES	— Large Eddy Simulation
PDF	— Probability Density Function
RANS	— Reynolds Averaged Navier–Stokes
RNG	— Renormalization Group
RSM	— Reynolds Stress Model
SGS	— Sub-Grid Scale
SST	— Shear Stress Transport
URANS	— Unsteady Reynolds Averaged Navier–Stokes

Введение

Точный расчет струйных течений играет важную роль в приложениях, связанных с авиацией, а также во многих технических и технологических процессах. Для определения зоны безопасного нахождения людей и техники около самолета с работающим двигателем требуется правильное описание распространения выхлопной струи турбореактивного двигателя вдоль поверхности аэродрома. Ужесточение экологических норм по уровню шума самолетов требует точного расчета течения в струях, что необходимого для последующего вычисления акустических параметров струи, исследования влияния геометрии сопла на течение в струе и на уровень шума в ней. На режиме взлета происходит взаимодействие горячей турбулентной струи с элементами механизации крыла, что вызывает увеличение шума и приводит к механическим повреждениям.

В зависимости от режима течения в струйном пограничном слое (область вязкого перемешивания, в которой вещество струи смешивается с веществом внешней среды) различают ламинарные и турбулентные струи. Ламинарные струи являются, скорее, исключением, а не правилом. Большинство струйных течений жидкостей, газов и плазмы, встречающихся в природе и технике, являются турбулентными. Турбулентность оказывает влияние на процессы смешения, горения и переноса частиц дисперсной примеси.

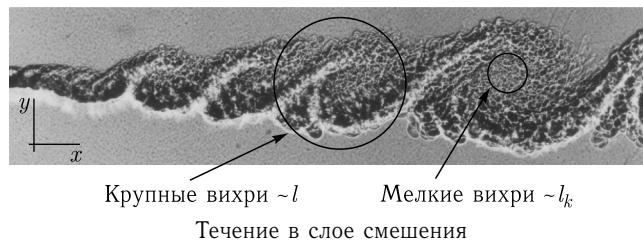
Несмотря на интенсивное развитие вычислительной техники и достигнутые успехи в области построения численных методов и разработке соответствующего математического обеспечения, проблема численного моделирования турбулентности остается одной из наиболее сложных и важных проблем механики жидкости и газа. В отличие от ламинарных течений, расчет которых стал во многом рутинной процедурой, надежное предсказание характеристик турбулентных течений по ряду причин (трехмерный характер течения, стохастическая природа и широкий пространственно-временной спектр масштабов) остается, скорее, искусством, чем строгой наукой.

Вихревая природа. В ламинарном течении под действием напряжений, обусловленных молекулярной вязкостью, кинетическая энергия среднего течения непосредственно превращается во внутреннюю тепловую энергию.

В турбулентном потоке крупные вихри отбирают энергию у среднего течения и сохраняют ее некоторое время, пока она не перейдет к мелким вихрям, рассеивающим кинетическую энергию в тепло.

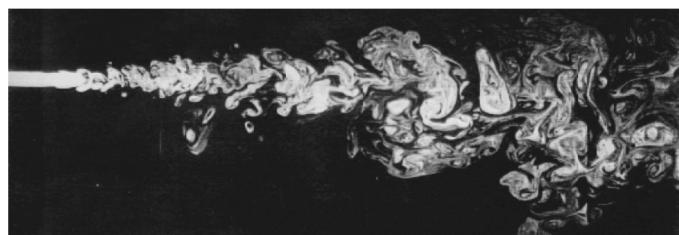
Иллюстрацией вихревой природы турбулентных течений и иерархии вихрей различного масштаба служат теневые фотографии течений в свободном слое смешения и в свободной затопленной струе. Визуальное свидетельство мелкомасштабной структуры турбулентности обнаруживается, если в турбулентном течении имеются температурные флуктуации. Градиенты температуры и показатель преломления оказываются наиболее крутыми, если они связаны с вихрями наименьшего масштаба. Любая оптическая система, которая чувствительна к таким флукутирующим градиентам, фиксирует мелкомасштабную структуру турбулентности.

Пластина, находящаяся за левым краем рисунка, разделяет высокоскоростное течение (сверху от пластины) от низкоскоростного (снизу от пластины). В данном случае диссипация кинетической энергии турбулентности имеет место в диапазоне волновых чисел $0,1 < \kappa/\kappa_k < 1$, что соответствует интервалу масштабов $6 < l/l_k < 60$, где κ_k и l_k — волновое число и масштаб Колмогорова.



На другой фотографии показана турбулентная струя, истекающая из круглого сопла в затопленное пространство. При малых относительных расстояниях от среза сопла струя является ламинарной. На расстояниях порядка нескольких калибров от среза сопла возникает неустойчивость струи с последующим образованием вихревых колец и переход к состоянию турбулентного движения.

Основной механизм, который отвечает за распределение энергии турбулентного потока по широкому диапазону масштабов (волновых чисел или длин волн), связан с растяжением вихрей (молей, сгустков завихренности). В процессе растяжения вихрей их кинетическая эн-



Течение в свободной затопленной струе

гия вращательного движения увеличивается, а масштаб уменьшается. Увеличение местных скоростей деформаций стимулирует растяжение других вихрей, запуская тем самым каскадный процесс интенсификации движения с постепенной редукцией масштабов вихрей, подвергнутых растяжению.

Каскадный процесс передачи энергии в турбулентном потоке, использующий представление о существовании иерархии вихрей различного масштаба, завершается на самых мелкомасштабных структурах вязкой диссипацией кинетической энергии в тепло (в процессе растяжения вихрей вязкость не играет существенной роли).

Пренебрегая вязкостью, из закона сохранения момента количества движения следует, что произведение завихренности на квадрат радиуса является постоянным. Другими словами, в отсутствие сил вязкости, в процессе растяжения циркуляция скорости вокруг вихревых элементов остается постоянной. Следовательно, растяжение в одном направлении приводит к уменьшению размеров и увеличению скорости в двух других направлениях, вследствие чего растяжению подвергаются вихревые трубы, имеющие составляющие завихренности вдоль этих направлений. Вследствие нелинейности процесса интенсификации завихренности, растяжение преобладает над сжатием.

Статистические модели. В статистической теории турбулентности обычно выделяют следующие направления и подходы:

- функциональный подход, основанный на рассмотрении характеристического функционала и уравнения Колмогорова–Хопфа;
- формализм конечномерных распределений вероятности флюктуирующих параметров потока в пространстве и времени;
- формализм моментов, связанный с бесконечной зацепляющейся цепочкой уравнений Фридмана–Келлера.

При этом лишь функциональный подход к теории турбулентности, основанный на решении уравнения Колмогорова–Хопфа, является замкнутым. Однако, отсутствие математической теории уравнений в вариационных производных не позволяет получить на этом пути до сих пор каких-либо конкретных результатов.

В связи со сложностью решения задачи на уровне конечномерных распределений вероятности, на практике используется ряд более простых статистических величин, определяющих частные свойства потока.

Уравнения для конечномерных плотностей распределения вероятности позволяют получить бесконечную зацепляющуюся систему уравнений Фридмана–Келлера для всевозможных моментов. С вопросом о разрешимости системы уравнений Фридмана–Келлера тесно связана задача об аппроксимации бесконечной цепочки уравнений конечной системой, решения которой близки к решениям цепочки.

Методы моделирования. Решение осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса (Reynolds-Averaged Navier–Stokes, RANS),

замкнутых при помощи той или иной полуэмпирической модели турбулентности, оказывается неэффективным при моделировании турбулентных течений с нестационарными крупномасштабными вихревыми структурами, свойства которых зависят от конкретных граничных условий и геометрических характеристик течения.

Хотя возможности усовершенствования полуэмпирических моделей турбулентности еще не до конца исчерпаны (хотя это и ставится многими под сомнение), существенный прогресс в этой области представляется сомнительным, а создание универсальной полуэмпирической модели турбулентности, пригодной для расчета всех или, по крайней мере, большинства турбулентных течений — неразрешимой задачей. Возросшие возможности вычислительной техники заставили изменить оценку возможностей классической теории турбулентности и стимулировали поиск и разработку новых подходов к моделированию турбулентных течений.

Рост ресурсов вычислительной техники и неудовлетворенность результатами, получаемыми на основе подхода Рейнольдса, обозначили интерес к прямому численному моделированию (Direct Numerical Simulation, DNS) турбулентных течений на основе полных уравнений Навье–Стокса. Фундаментальной основой для использования уравнений Навье–Стокса служит то обстоятельство, что пространственно-временные масштабы турбулентности существенно превосходят пространственно-временные масштабы молекулярных движений.

Несмотря на дороговизну расчетов, на основе DNS удалось получить ряд интересных результатов, среди которых следует отметить моделирование однородной изотропной турбулентности при умеренных числах Рейнольдса, моделирование инерционной подобласти спектра двумерной турбулентности и энергосодержащей области спектра трехмерной турбулентности, а также установление различий между двумерной и трехмерной турбулентностью. В двумерном случае каскадный процесс передачи энергии осуществляется вверх по шкале волновых чисел (в направлении к более крупным вихрям), а в трехмерном — в обратном направлении (от крупных вихрей к мелким).

Ограниченностю DNS послужила стимулом для развития другого направления — метода моделирования крупных вихрей (Large Eddy Simulation, LES), хотя в действительности речь идет о моделировании вихрей с подсеточными масштабами (с масштабами, меньшими размера шага сетки). Основная идея LES заключается в формальном математическом разделении крупных и мелких вихревых структур посредством той или иной операции, например, операции фильтрации. В качестве среднего значения функции в точке берется среднее значение этой функции по объему ячейки расчетной сетки. Чем больше объем осреднения (шаг сетки или ширина фильтра), тем больше теряется информации о процессах подсеточного переноса.

Операция осреднения с фильтром приводит к уравнениям, содержащим средние значения произведений составляющих скорости, и чле-

нам, содержащим скорости мелкомасштабных пульсаций, в том числе, тензор напряжений для этих пульсаций (тензор подсеточных напряжений). Тензор, учитывающий влияние мелкомасштабных вихрей на эволюцию крупномасштабных вихревых структур, моделируется, что и составляет суть методики подсеточного моделирования.

Подсеточные модели (Sub-Grid Scale, SGS) являются более универсальными по сравнению с одноточечными моделями замыкания, используемыми в подходе Рейнольдса, поскольку мелкомасштабная турбулентность по своей природе представляется более универсальной, чем крупномасштабная турбулентность. Однако удовлетворительная точность схем замыкания для мелкомасштабной турбулентности достигается лишь тогда, когда разделение течения на мелкомасштабную и крупномасштабную составляющие не оказывает заметного влияния на эволюцию крупномасштабных вихревых структур.

Наиболее простой и во многих случаях наиболее предпочтительной в вычислительном плане является модель Смагоринского. Турбулентная вязкость определяется средним значением скорости диссипации, приходящейся на единицу объема. Величина скорости диссипации в общем случае неизвестна. Однако в случае, если инерционный интервал спектра выражен достаточно отчетливо, скорость диссипации выражается через среднюю скорость деформации.

Достоинства RANS (высокая точность и экономичность в области присоединенного пограничного слоя) и LES (универсальность и приемлемые вычислительные затраты в отрывной области потока) сочетает комбинированный подход, получивший наименование моделирования отсоединенных вихрей (Detached Eddy Simulation, DES). Выбор того или иного подхода к описанию турбулентности (RANS или LES) производится автоматически в зависимости от соотношения между локальным размером вычислительной сетки и характерным линейным масштабом турбулентности в рассматриваемой точке потока. Использование уравнений Рейнольдса для описания течения в пограничном слое позволяет снять жесткие ограничения на размеры ячеек сетки в пристеночной области в направлении, параллельном стенке.

Вплоть до точки отрыва пограничный слой описывается с помощью уравнений Рейнольдса. Решения, полученные в рамках уравнений Рейнольдса и LES, не совпадают вне области отрыва, поскольку в силу глобальной нестационарности решения и эллиптических эффектов течение вверх по потоку от точки отрыва зависит от характера его эволюции вниз по потоку. Модель турбулентности, лежащая в основе DES, влияет на положение точки отрыва, а следовательно, и на точность решения в целом.

Конкретные реализации подхода основаны на использовании для замыкания уравнений Рейнольдса модифицированной модели турбулентной вязкости Спаларта–Аллмараса и модели Ментера.

В области отрыва потока модель турбулентности переходит в дифференциальную подсеточную модель, которая при выполнении условия

равновесия (генерация равняется диссипации) аналогична подсеточной модели Смагоринского.

Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными для широкого круга отрывных турбулентных течений демонстрируют высокую эффективность и экономичность DES. Наряду с этим, не совсем ясны остаются вопросы об адекватности DES в области перехода от уравнений Рейнольдса к LES (так называемая серая область). Имеются также и другие реализации комбинированных подходов, например, подход Hybrid RANS/LES, которые в некоторых случаях оказываются предпочтительными по сравнению с DES.

Следует подчеркнуть, что DNS, LES и DES являются принципиально трехмерными (даже в случае двумерной геометрии) нестационарными подходами. Возможность расчета флюкутирующих параметров потока, предоставляемая современными подходами к моделированию турбулентных потоков, позволяет прийти к глубокому пониманию природы турбулентности.

Широкое распространение получила визуализация течения, которая улучшила понимание структуры турбулентных течений.

Графическое представление результатов расчетов нестационарных течений продвинуто на высокий уровень совершенства. Компьютерная мультиплексия удивительно повторяет мультиплексию, полученную киносъемкой визуализированного течения в лабораторных условиях. При этом исследователь освобождается от многочисленных ограничений, связанных с лабораторными исследованиями.

Достигнутые успехи не означают, что LES и DES решают все стоящие перед исследователями проблемы и являются готовыми инструментами для решения инженерных задач. Для этого предстоит решить ряд методических вопросов, в частности, разработать методы построения и разумные критерии оценки качества сеток, рациональные способы задания начальных и граничных условий, а также ряд других. В многочисленных расчетах опробован широкий круг подсеточных моделей, фильтров, граничных условий и конечно-разностных схем. Несмотря на это, неясны ни оптимальный выбор подсеточной модели, ни обоснование выбора такого варианта. Нет также универсальных пристеночных функций, обеспечивающих уменьшение количества узлов вблизи стенки, в связи с чем LES затруднительно использовать для расчетов течений с малыми отрывными зонами и точками перехода, например, для расчета обтекания профиля под углом атаки.

Имеющиеся публикации. Вопросы, относящиеся к разработке моделей и методов моделирования струйных течений, нашли достаточно широкое освещение как на страницах книг, так и в периодической печати. Теория турбулентных струйных течений и имеющиеся методы расчета в данной книге обсуждаются в краткой форме, поскольку имеются фундаментальные монографии Г.Н. Абрамовича, Л.А. Вулиса

и В.П. Кашкарова, А.С. Гиневского, а также другие труды по газовой динамике, в которых эти вопросы излагаются подробно.

В книге М.И. Гуревича ¹⁾ излагаются основные идеи и результаты теории струй невязкой жидкости и кавитационных течений, а также рассматривается решение многочисленных задач, имеющих практические приложения. Обсуждаются вопросы струйного обтекания различных препятствий, моделирования неустановившихся течений, учета сил тяжести и поверхностного натяжения и ряд других.

Результаты исследований распространения ламинарных и турбулентных струй вязкой несжимаемой жидкости и сжимаемого газа излагаются в книге Л.А. Вулиса и В.П. Кашкарова ²⁾. Приводится решение некоторых специальных задач, имеющих отношение к моделированию струйных течений.

Систематический анализ многочисленных экспериментальных данных о профилях скорости, температуры и концентрации примеси, а также об очертании зоны турбулентного перемешивания дается в книге Г.Н. Абрамовича ³⁾. Излагается теория турбулентных газовых струй, в том числе сильно подогретых и сверхзвуковых струй. Учитывается влияние начальной неравномерности полей скорости, температуры и концентрации примеси, а также рассматривается влияние продольного градиента давления на характер растекания струи. Рассматривается теория турбулентных газовых струй и даются экспериментально проверенные методы практического расчета сверхзвуковых неизотермических струй газа, справедливые как в изобарическом случае, так и при неравных давлениях в начальном сечении струи и в окружающем ее потоке газа. Приводится решение ряда задач о растекании струи в ограниченном и полуограниченном пространстве, а также обсуждаются различные приложения теории струй (струя в боковом потоке жидкости, конвективная струя, двухфазная струя смеси газа с каплями жидкости или твердыми частицами, камера смешения эжектора).

Результаты последующих теоретических, экспериментальных и численных исследований приводятся и обобщаются в серии книг, вышедших под редакцией Г.Н. Абрамовича ⁴⁾ ⁵⁾ ⁶⁾.

¹⁾ Гуревич М.И. Теория струй идеальной жидкости. — М.: Наука, 1979.

²⁾ Вулик Л.А., Кашкаров В.П. Теория струй вязкой жидкости. — М.: Наука, 1965.

³⁾ Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. — М.: Физматгиз, 1960.

⁴⁾ Абрамович Г.Н., Крашенинников С.Ю., Секундов А.Н., Смирнова И.П. Турбулентное смешение газовых струй. — М.: Наука, 1974.

⁵⁾ Абрамович Г.Н., Крашенинников С.Ю., Секундов А.Н. Турбулентные течения при воздействии объемных сил и неавтомодельности. — М.: Машиностроение, 1975.

⁶⁾ Абрамович Г.Н., Гирилович Т.А., Крашенинников С.Ю., Секундов А.Н., Смирнова И.П. Теория турбулентных струй. — М.: Наука, 1984.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований турбулентных струйных течений постоянной и переменной плотности, а также основы современных полуэмпирических теорий турбулентности обсуждаются в книге А.С. Гиневского¹⁾. Приводятся результаты экспериментальных исследований микроструктуры разнообразных струйных течений. Теоретические исследования основываются на использовании интегральных методов расчета, нашедших широкое применение при решении задач теории турбулентного пограничного слоя. С помощью интегральных методов с единых позиций при минимальном числе допущений получено решение широкого круга задач (переходный участок струи в спутном потоке, струи и следы в спутном потоке с продольным градиентом давления, радиально-щелевые расходящиеся и сходящиеся струи).

Книга С.М. Белоцерковского и А.С. Гиневского²⁾ посвящена разработке и применению метода дискретных вихрей для моделирования струйных и отрывных течений. Описываются методы расчета статистических характеристик плоских, осесимметричных и пространственных турбулентных струй и следов. Исследуется процесс формирования струи и определяется скорость распространения ее фронта. Показывается роль крупномасштабных когерентных структур и изучается влияние периодического возбуждения струйных течений на их характеристики.

В книге А.С. Гиневского, Е.В. Власова, Р.К. Карасова³⁾ излагаются результаты экспериментального исследования управления аэродинамическими и акустическими характеристиками дозвуковых и сверхзвуковых турбулентных струй путем воздействия на них акустических возмущений различной интенсивности и частоты. Исследуются когерентные структуры в дозвуковых турбулентных струях и их восприимчивость к воздействию гармонических акустических возмущений, генерация и подавление турбулентности в дозвуковых струях при низкочастотном/высокочастотном акустическом возбуждении дозвуковых струй, а также увеличение/уменьшение широкополосного шума таких струй. Рассматриваются активные и пассивные методы управления характеристиками сверхзвуковых неизобарических струй. Анализируются методы математического моделирования дозвуковых турбулентных струй с точки зрения их способности описать влияние периодического возбуждения на интенсификацию/ослабление турбулентного смешения при низкочастотном/высокочастотном возбуждении.

¹⁾ Гиневский А.С. Теория турбулентных струй и следов. Интегральные методы расчета. — М.: Машиностроение, 1969.

²⁾ Белоцерковский С.М., Гиневский А.С. Моделирование турбулентных струй на основе метода дискретных вихрей. — М.: Физматлит, 1995.

³⁾ Гиневский А.С., Власов Е.В., Каравов Р.К. Акустическое управление турбулентными струями. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001.

Математическое моделирование тепломассообмена в сложных термогидрогазодинамических процессах в многокомпонентных струйных и пленочных течениях, описываемых нелинейными уравнениями переноса количества движения, вещества и энергии, рассматривается в книге Л.П. Холпанова, Е.П. Запорожца, Г.К. Зиберта, Ю.А. Кащицкого¹⁾. Многокомпонентные струйные течения и тепломассообмен в них исследуются в различных режимах: эжекционных, кавитационных, пульсационных, вихревых, свободно истекающих. При помощи использования общего нелинейного параболического уравнения устанавливается закономерность возникновения самоорганизации, маломодового хаоса, многомодовой турбулентности. Приводятся методы решения сложных нелинейных уравнений переноса в различных гидродинамических режимах.

Двухфазные струи рассматриваются в книге А.И. Накорчевского²⁾, а турбулентные стратифицированные струйные течения — в книге Е.В. Бруяцкого³⁾.

Достаточно полный обзор работ и вопросы математического моделирования турбулентных течений газовзвеси, включая общие вопросы газовой динамики многофазных сред, явления, связанные с взаимодействием индивидуальной частицы с газовым потоком, свойства газовзвесей и их использование в промышленности и технологических процессах рассматриваются в книге А.А. Шрайбера, Л.Б. Гавина, В.А. Наумова, В.П. Яценко⁴⁾. Основное внимание уделяется разработке метода пространственно-временного осреднения для расчета корреляционных моментов, связанных с дисперсной фазой, а также выводу и замыканию уравнений $k-\varepsilon$ модели турбулентности с учетом влияния частиц на характеристики турбулентности. Возможности разработанного подхода демонстрируются на примере расчета струйных течений с твердыми частицами, а также ряда других течений.

Широкий круг численных методов, особенностей их реализации и инженерных приложений в различных областях техники рассмотрен в книгах К.Н. Волкова и В.Н. Емельянова. В этих книгах рассматриваются задачи, связанные с моделированием крупных вихрей тур-

¹⁾ Холпанов Л.П., Запорожец Е.П., Зиберт Г.К., Кащицкий Ю.А. Математическое моделирование нелинейных термогидрагазодинамических процессов в многокомпонентных струйных течениях. — М.: Наука, 1998.

²⁾ Накорчевский А.И. Гетерогенные турбулентные струи: математическое моделирование и экспериментальные исследования. — Киев: Наукова думка, 1980.

³⁾ Бруяцкий Е.В. Турбулентные стратифицированные струйные течения. — Киев: Наукова думка, 1986.

⁴⁾ Шрайбер А.А., Гавин Л.Б., Наумов В.А., Яценко В.П. Турбулентные течения газовзвеси. — Киев: Наукова думка, 1987.

булентных течений¹⁾, решение задач двухфазной гидро- и газодинамики²⁾, приложения современных информационных и вычислительных технологий к задачам расчета течений и теплообмена в проточных частях и вращающихся кавернах газовых турбин и компрессоров³⁾, газодинамических трактах ракетных двигателей твердого топлива⁴⁾, а также общие вопросы, связанные с разработкой и реализацией математического обеспечения для решения задач вычислительной газовой динамики и теплообмена⁵⁾.

Теоретические основы расчета до- и сверхзвуковых струйных течений с учетом физико-химических превращений даются в книге В.А. Зазимко⁶⁾. Дается обзор современных моделей расчета турбулентных течений, а также излагаются основы теории и методы расчета прямоточного газового факела на базе метода точечных источников. Обсуждается структура течения в турбулентных струях различного типа, включая струи с диффузионным факелом горения.

Нерешенные проблемы. К настоящему времени разработано большое количество полуэмпирических и численных методов расчета течения в газовых струях, дающих возможность рассчитать турбулентные и ламинарные, дозвуковые и сверхзвуковые (в том числе нерасчетные) струи с учетом двухфазности, химических реакций в слое смешения, неравновесности течения и других процессов. В имеющихся расчетных методах для получения решения используются эмпирические законы турбулентного перемешивания, скорости химических реакций, интенсивности излучения, полученные в условиях, не позволяющих считать эти законы универсальными.

Традиционные модели турбулентности не описывают многие эффекты (даже на качественном уровне), связанные с вихревой структурой и теплообменом в трехмерных струйных течениях. Например, при развитии прямоугольной струи смешение с окружающей средой происходит более интенсивно вдоль короткой стороны, и поперечный размер струи в этом направлении становится больше, чем вдоль длин-

¹⁾ Волков К.Н., Емельянов В.Н. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. — Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2008.

²⁾ Волков К.Н., Емельянов В.Н. Течения газа с частицами. — Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2008.

³⁾ Волков К.Н., Емельянов В.Н. Течения и теплообмен в каналах и вращающихся полостях. — Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2010.

⁴⁾ Волков К.Н., Емельянов В.Н. Газовые течения с массоподводом в каналах и трактах энергоустановок. — Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2011.

⁵⁾ Волков К.Н., Емельянов В.Н. Вычислительные технологии механики жидкости и газа. — Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2012.

⁶⁾ Зазимко В.А. Теоретические основы расчета до- и сверхзвуковых струйных течений с учетом физико-химических превращений. — СПб: Изд-во БГТУ, 2006.

ной стороны (переворот осей в прямоугольной струе). Другой эффект наблюдается при распространении круглой струи вдоль стенки, когда смешение и растекание струи вдоль стенки идет более интенсивно, чем в направлении, перпендикулярном к стенке.

Для повышения точности численного моделирования и повышения информативности описания турбулентных течений жидкости и газа вместо RANS и моделей турбулентности используются методы прямого численного моделирования и моделирования крупных вихрей.

В отличие от течений в пограничных слоях и каналах, прямое численное моделирование и моделирование крупных вихрей струйных течений развивается медленнее, а точность таких расчетов является сравнительно невысокой. Несмотря на достаточно большое число публикаций по моделированию затопленных турбулентных струй и развитие ряда оригинальных подходов, анализ известных результатов расчетов струйных течений методами DNS и LES показывает сравнительно низкую точность описания основных параметров струи, что связывается со специфическими особенностями численного моделирования турбулентных струй (постановка граничных условий, наличие нескольких масштабов, использование неравномерной по длине струи сетки, выбор подсеточной модели).

Фундаментальной проблемой динамики струйных течений является эволюция вихревых структур, характерной стороной которых является их устойчивость.

Шум турбулентной струи остается одним из определяющих источников шума реактивных самолетов. Основная причина генерации звука состоит в образовании вихрей и их ускоренном движении в неоднородном поле течения при обтекании тел, а также при истечении газа в покоящуюся или движущуюся среду. Нестационарные составляющие потока в пограничных слоях около обтекаемых тел или в свободных слоях, таких как зона смешения струи, приводят к непрерывной генерации вихрей. В образовании шумов важную роль играют тепловые процессы, протекающие при горении, а также в потоках нагретых газов, для которых, помимо завихренности потока, существенную роль играет неоднородность энтропии, проявляющаяся в виде температурных пятен.

Одна из проблем реализации идеи активного управления турбулентными струями упирается в недостаточное понимание механизмов образования шума (понимание структуры и свойств излучающей турбулентности).

Перспективным направлением применения лазерных систем является их использование в авиационной технике для решения задач навигации при взлете и посадке самолетов, в системах связи, наземных и бортовых устройствах для мониторинга уровня турбулентности, обнаружения и измерения параметров локализованных воздушных потоков, представляющих опасность для летательного аппарата. При проектировании таких систем требуется оценивать их точностные

и энергетические характеристики, учитывать влияние помех, в том числе и создаваемых турбулентной струей двигателя.

При разработке лазерных систем важную роль играет информация о параметрах лазерных пучков, искаженных турбулентной струей двигателя. Аналитические и численные модели распространения лазерного излучения в условиях естественной атмосферной турбулентности, подтвержденные многочисленными экспериментальными исследованиями, хорошо известны. В то же время характеристики лазерных пучков, распространяющихся в условиях высокоскоростной и высокотемпературной турбулентной струи, изучены в существенно меньшей степени.

Для практических приложений представляет интерес повышение точности расчета струйных течений с помощью LES, совершенствование этих методов, создание эффективных комбинированных RANS/LES методов для совместного расчета течения в соплах и выхлопных струях, истекающих на различных режимах истечения, в том числе, и сверхзвуковых.

Содержание книги. В данной книге разрабатываются эффективные подходы, позволяющие обеспечить высокую точность расчета турбулентных струй, истекающих из сопел с различной конфигурацией выходного сечения, при малых вычислительных затратах, и с их помощью исследуются сложные турбулентные струи, в том числе струи с физико-химическими превращениями и струи газовзвеси.

Важный этап при построении математических моделей составляют систематический обзор и обобщение имеющихся данных и результатов, критический анализ возможностей использования известных решений и полученных результатов и разработка на этой основе более правильных физических представлений, а также методических и расчетных рекомендаций. Изучение предшествующих работ позволяет проследить за этапами развития идей и наметить пути дальнейших исследований. В связи с этим, существенное место отводится изложению и анализу имеющихся решений и подходов.

Разрабатываются статистические модели, основанные на представлении о переносе квазичастицами комплексов газодинамических параметров в заданную точку пространства зоны турбулентного смешения струи с окружающей средой. Статистические модели применяются для расчета параметров одиночных турбулентных струй, блочных (составных) струй одинакового химического состава и блочных струй, образованных одиночными струями с различным химическим составом, истекающих из сопел со сложной конфигурацией выходных сечений.

Проводится анализ известных численных методов высокой точности для расчета несжимаемых и сжимаемых течений. На основе современных подходов к моделированию турбулентности приводится решение ряда задач, связанных с исследованием свободных струйных течений и течений, возникающих при взаимодействии турбулентных струй с препятствиями. Устанавливаются свойства этих течений и влияние

на них входных параметров задачи. Исследуется генерация и эволюция крупномасштабных вихревых структур в слое смешения струи с окружающей средой и их влияние на теплообмен струи с преградой.

Рассматривается моделирование крупных вихрей турбулентных течений в неизотермических струях газа и низкотемпературной плазмы, а также движения и рассеивания частиц дисперсной примеси под воздействием турбулентных пульсаций несущего потока на основе статистического варианта дискретно-траекторного подхода. Исследуется влияние условий истечения, начальных параметров фаз и условий ввода частиц в струйный поток на закономерности рассеивания и теплообмен примеси.

Обсуждается моделирование крупных вихрей и аэрооптических эффектов в свободных сдвиговых турбулентных течениях. Исследуются искажения фазовой функции когерентного луча, индуцированные турбулентными флуктуациями струйного потока.

Сравниваются результаты расчетов, полученные на основе различных подходов, с имеющимися расчетными данными и данными физического эксперимента.

Обобщаются результаты расчетов струйных течений, создается методическая база и предлагаются рекомендации для инженерной практики. Обсуждается оценка точности определения характеристик турбулентных струй при совместном расчете течений в соплах разных типов и струях, исследуется влияние параметров течения на срезе сопла на характеристики турбулентности в струе и влияние геометрии сложных сопел на характеристики турбулентности струйных течений.

В монографии излагаются оригинальные разработки и результаты, полученные авторами в Балтийском государственном техническом университете (Санкт-Петербург), университете Центрального Ланкашира (Престон, Великобритания), Университете Суррея (Гилфорд, Великобритания) и Университете Кингстона (Лондон, Великобритания). Материал, вошедший в книгу, использовался при подготовке цикла лекций и лабораторных практикумов на кафедрах процессов управления и плазмогазодинамики и теплотехники БГТУ.

Глава 1

ХАРАКТЕРИСТИКИ И МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТУРБУЛЕНТНЫХ СТРУЙНЫХ ТЕЧЕНИЙ

Струйные течения являются распространенной формой движения жидкости и газа в природе и технике и характеризуются широким разнообразием. Большинство струйных течений, встречающихся в природе и технике, являются турбулентными. Турбулентность оказывает влияние на процессы смешения, горения, генерации шума, распространение излучения и перенос частиц дисперсной примеси.

К настоящему времени разработано большое количество полуэмпирических и численных методов расчета течения в газовых струях, дающих возможность рассчитать ламинарные и турбулентные, дозвуковые и сверхзвуковые (в том числе нерасчетные) струи с учетом двухфазности, химических реакций в слое смешения, неравновесности течения и других процессов. В имеющихся расчетных методах для получения решения используются эмпирические законы турбулентного перемешивания, скорости химических реакций, интенсивности излучения, полученные в условиях, не позволяющих считать эти законы универсальными.

Традиционные модели турбулентности не описывают многие эффекты (даже на качественном уровне), связанные с вихревой структурой и теплообменом в трехмерных струйных течениях. Для повышения точности численного моделирования и повышения информативности описания турбулентных течений жидкости и газа вместо решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса, замкнутых при помощи той или иной модели турбулентности, используются методы прямого численного моделирования и моделирования крупных вихрей.

В данной главе излагаются некоторые сведения о теории турбулентных струйных течений, а также обсуждаются модели и методы расчета параметров турбулентных струй различного класса (интегральные методы, полуэмпирические модели турбулентности, прямое численное моделирование, моделирование крупных вихрей). На основе сравнения расчетных и экспериментальных данных выявляются их достоинства и недостатки. Для анализа расчетных методов используются следующие критерии: полнота и достоверность получаемой информации (степень адекватности модели); степень универсальности модели (возможность использования в расчетах различных типов турбулентных струй);

универсальность и количество опытных зависимостей, вводимых в модель; простота вычислительной процедуры и программной реализации; наличие и объем информации, получаемой в процессе расчета.

1.1. Классификация струйных течений

Струя представляет собой форму течения жидкости (газа), при которой жидкость (газ) течет в окружающем пространстве, заполненном жидкостью (газом) с отличающимися от струи параметрами (скоростью, температурой, плотностью, составом). В приближенной модели течения идеальной жидкости граница струи является поверхностью тангенциального разрыва и вещество струи не смешивается с веществом окружающего пространства. В реальных течениях ввиду неустойчивости тангенциального разрыва и влияния вязкости между струей и окружающим ее внешним пространством возникает слой вязкого перемешивания, в котором имеют место непрерывные изменения параметров течения, а также происходит генерация вихревых структур. При этом ширина области смешения вдоль направления распространения струи увеличивается, а поля скорости и других газодинамических переменных постепенно сглаживаются. При моделировании струйных течений рассматриваются изменения параметров потока как в самой струе, так и в окружающей среде.

Классификация струйных течений проводится по наиболее существенным признакам, характеризующим течение в струе.

Практическое значение имеют струи, вытекающие из сопла или отверстия в стенке сосуда. В зависимости от формы поперечного сечения отверстия (сопла) различают круглые, квадратные, плоские и другие виды струй, а в зависимости от направления скорости течения на срезе сопла — осевые, веерные и закрученные струи.

В соответствии с характеристиками вещества рассматриваются струи жидкости, газа и плазмы. В особый класс выделяются двухфазные струи, например, струи газа, содержащие жидкие или твердые частицы, или струи жидкости, заполненные пузырьками газа.

Сжимаемость среды характеризуется числом Маха (отношение скорости истечения струи к скорости звука на срезе сопла). В зависимости от значения числа Маха на срезе сопла различают дозвуковые струи ($M < 1$) и сверхзвуковые струи ($M > 1$). Такая же классификация в зависимости от числа Маха проводится и для скорости среды, в которую вытекает струя.

В зависимости от направления скорости течения жидкости (газа) в окружающей среде различают струи, вытекающие в спутный (направленный в ту же сторону), встречный и сносящий потоки (например, струя жидкости, вытекающая из трубы во внешний поток и направленная, соответственно, по течению, против течения и под углом к скорости внешнего течения). При идентичном составе жидкости (газа) в струе и окружающей ее неподвижной среде струя называется

затопленной (например, струя воздуха, вытекающая в неподвижную атмосферу). Струя называется свободной, если она вытекает в среду, не имеющую ограничивающих поверхностей, полуограниченной, если она течет вдоль плоской стенки, и стесненной, если она вытекает в среду, ограниченную твердыми стенками (например, струя, вытекающая в трубу большего диаметра, чем диаметр сопла).

В соответствии с физическими особенностями вещества струи и внешней среды различают смешивающиеся струи (струя газа, вытекающая в воздух) и несмешивающиеся струи (струя воды, вытекающая в атмосферу). Поверхность несмешивающейся струи является неустойчивой, и на некотором расстоянии от среза сопла струя распадается на капли. Дальнобойность такой струи, под которой понимается расстояние, на котором струя сохраняется монолитной, зависит от физических свойств ее вещества, кинетической энергии и уровня начальных возмущений в сопле.

В случае, когда вещество струи смешивается с веществом внешней среды, на поверхности струи образуется область вязкого перемешивания (струйный пограничный слой). В зависимости от режима течения в струйном пограничном слое различают ламинарные и турбулентные струи. Ламинарные струи являются, скорее, исключением, а не правилом. Большинство струйных течений жидкостей, газов и плазмы, встречающихся в природе и технике, являются турбулентными. Турбулентность оказывает влияние на процессы смешения, горения и переноса частиц дисперсной примеси.

При наличии в продуктах сгорания топлива продуктов неполного окисления в струйном пограничном слое происходит догорание продуктов неполного окисления в воздухе, заносимом сюда турбулентными вихрями из окружающей среды, приводя к формированию диффузионного факела.

Струя, вытекающая из сопла реактивного двигателя летящего самолета, представляет собой пример сверхзвуковой турбулентной струи, вытекающей в спутный поток, который, в зависимости от скорости полета самолета, является дозвуковым или сверхзвуковым.

1.2. Структура турбулентной струи

Рассмотрим структуру и основные закономерности распространения одиночных и блочных до- и сверхзвуковых турбулентных струй жидкости и газа, истекающих из круглого сопла в затопленное пространство или спутный поток [69, 70].

1.2.1. Условия истечения. Начальные условия истечения характеризуются распределениями в выходном сечении сопла средней скорости, температуры, энергии и масштаба турбулентности. Применительно к затопленным струям с почти равномерными распределениями параметров по сечению (вне пограничного слоя на срезе сопла)

для характеристики начальных условий истечения используются число Рейнольдса ($Re_a = u_a d_a / \nu$), число Maxa ($M_a = u_a / a$), степень неизотермичности ($\vartheta_a = T_a / T_\infty$), степень турбулентности в центре выходного сечения сопла ($\theta_a = u' / u_a$), толщина вытеснения, толщина потери импульса и формпараметр пограничного слоя в выходном сечении сопла (δ^* , δ_a и $H = \delta^* / \delta_a$). К начальным условиям истечения относится также режим течения в пограничном слое в выходном сечении сопла (ламинарный, переходный, турбулентный). Для струи в спутном потоке требуется знать параметры спутного потока в плоскости выходного сечения сопла и параметр спутности ($m = u_\infty / u_a$). В струях переменного состава задается отношение плотностей вещества струи и спутного потока.

При моделировании коаксиальных струй используется геометрический параметр, равный отношению диаметров внутреннего и внешнего диаметров сопла.

Геометрические параметры устройства, формирующего струю (форма поперечного сечения струи в ее начальном сечении), оказывают существенное влияния на ее характеристики. Вместо сопла иногда используется диафрагма с отрывным характером обтекания острой кромки для генерации плоской, круглой и эллиптической струи [59]. Для сравнения характеристик пространственных и круглых струй в качестве характеристического параметра сопла сложной формы используется эквивалентный диаметр d_e , который соответствует площади его выходного поперечного сечения ($S = \pi d_e^2 / 4$).

В общем случае начальные условия истечения определяются заданием профилей скорости, температуры, концентрации примеси, интенсивности и масштаба турбулентности на срезе сопла, а также числа Рейнольдса. При числе Рейнольдса $> 10^4$ струя считается полностью турбулентной. В работе [77] показывается, что струя с параболическим профилем скорости на срезе сопла сохраняет ламинарную форму течения с дальностью до 10 калибров.

1.2.2. Дозвуковая струя. Теоретические исследования гидродинамической устойчивости ламинарных струй показали их сильную неустойчивость, обусловленную специфической формой профиля продольной скорости с точкой перегиба [3, 95]. Экспериментальные исследования также зафиксировали быстрый переход к турбулентности при сравнительно небольших числах Рейнольдса. Струя обычно считается турбулентной при $Re > 10^4$, что выполняется в большинстве практических приложений.

В дозвуковой турбулентной струе, истекающей в затопленное пространство или спутный поток, давление на срезе сопла p_a устанавливается равным давлению в окружающей среде p_∞ . Течение газа в струе является близким к изобарическому, и изменение параметров струи вызывается процессами турбулентного перемешивания [58].

В случае изобарического течения, когда в спутном потоке отсутствует продольный градиент давления или скорости, изменения скорости, температуры и концентрации примеси в струе удовлетворяют условиям постоянства избыточного импульса, избыточного теплосодержания и избыточного содержания примеси [58]:

$$I = \int_S \rho u(u - u_\infty) dS = \text{const},$$

$$Q = \int_S \rho u(H - H_\infty) dS = \text{const},$$

$$J = \int_S \rho u(z - z_\infty) dS = \text{const}.$$

Здесь ρ — плотность, H — полное теплосодержание, z — массовая концентрация вещества.

Распространение изобарической струи на всем ее протяжении определяется распределениями основных параметров течения в начальном сечении.

Структуру дозвуковой турбулентной струи поясняет рис. 1.1. В дозвуковой струе жидкости или газа выделяют начальный, переходный и основной участки [3, 95]. Все три участка струи характеризуются собственными закономерностями развития. Несмотря на условность разделения струи на участки, оно оказывается плодотворным, облегчая решение задачи.

При равномерном распределении параметров на срезе сопла на границе между струей и окружающей средой возникает поверхность тангенциального разрыва (разрыв терпит, например, продольная скорость и температура). Вследствие неустойчивости поверхности тангенциального разрыва возникают турбулентные пульсации, вызывающие обмен количеством движения, тепла и концентрацией примеси между соседними слоями газа. Поверхность тангенциального разрыва размывается, и на границе струи и внешнего потока формируется область конечной толщины (слой вязкого перемешивания), состоящий из газа струи и смешивающегося с ней газа из внешней среды с непрерывными распределениями скорости, температуры и концентрации примеси (струйный пограничный слой). При удалении от среза сопла толщина струйного пограничного слоя увеличивается по зависимости, близкой

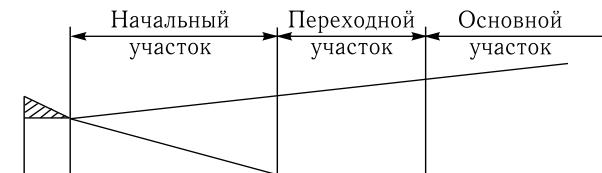


Рис. 1.1. Структура дозвуковой струи

к линейной. Расход газа в струе по мере удаления от среза сопла монотонно возрастает за счет газа, подсасываемого из внешнего пространства, но суммарное количество движения, определенное по избыточной скорости, остается неизменным.

Пограничный слой, постепенно расширяясь по длине струи, в некотором сечении касается оси, замыкая тем самым область, лежащую между внутренними границами пограничного слоя и называемую потенциальным ядром. Параметры течения в потенциальном ядре остаются неизменными и совпадают с параметрами газа на срезе сопла. Часть струи, содержащая потенциальное ядро, называется начальным участком. За начальным участком турбулентное перемешивание происходит по всему объему струи, вызывая изменения параметров в попечном сечении струи, которые по мере удаления от среза сопла приближаются к параметрам окружающей среды. При равномерном профиле скорости на срезе сопла и повышенной степени турбулентности длина начального участка уменьшается вплоть до его полного вырождения [58].

На больших удалениях от среза сопла его конфигурация и линейные размеры перестают влиять на распределения газодинамических параметров по длине и по сечению струи, что позволяет принять срез сопла для круглой струи за точечный источник массы, количества движения и энергии (в осесимметричном случае источником служит точка, а в плоскопараллельном случае — прямая линия, перпендикулярная к плоскости растекания струи). На этом участке струи, который получил название основного, движение газа считается автомодельным, т. е. предполагается, что газодинамические параметры зависят только от отношения r/x , где r — расстояние от оси струи до рассматриваемой точки, x — продольная координата, отсчитываемая от среза сопла.

Часть струи, заключенная между начальным и основным участками, называется переходным участком. На переходном участке струи турбулентное перемешивание распространяется на весь объем струи, но течение не является автомодельным. Во многих случаях используется упрощенная схема струи, полагая длину переходного участка равной нулю.

Линии равных значений безразмерной скорости u/u_a в плоской и круглой затопленных турбулентных струях представляют собой прямые линии, что свидетельствует о сравнительно небольшом отклонении профилей скорости от универсальных в начальном, переходном и основном участках [95].

Изменения скорости и толщины зоны смешения вдоль оси струи показывает рис. 1.2. На небольших расстояниях от среза сопла ($x/d_a < 1 \div 1,5$) тонкий слой смешения на начальном участке затопленной струи характеризуется начальной толщиной потери импульса на срезе сопла

$$\delta_a = \int_0^\delta \frac{\rho u}{\rho_a u_a} \left(1 - \frac{u}{u_a} \right) dy.$$

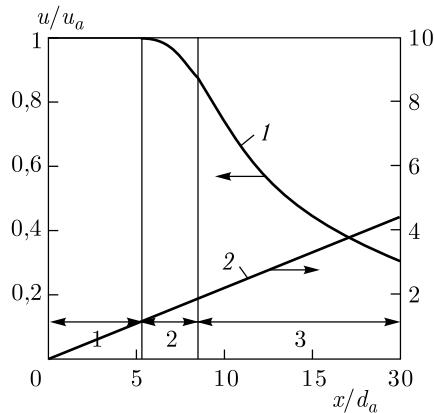


Рис. 1.2. Изменения скорости (линия 1) и толщины слоя смешения (линия 2) вдоль оси затопленной струи. Начальный (1), переходный (2) и основной (3) участки

на основном участке (так же как и толщина пограничного слоя на начальном участке) существенно увеличивается при увеличении степени турбулентности потока.

Наиболее простой случай струйного пограничного слоя имеет место при истечении жидкости с равномерным профилем скорости на срезе сопла в покоящуюся среду (затопленная струя). В начальном сечении струи толщина пограничного слоя равняется нулю. Утолщение струйного пограничного слоя, состоящего из увличенных частиц окружающей среды и заторможенных частиц самой струи, приводит к увеличению поперечного сечения (толщина пограничного слоя растет по линейной зависимости при увеличении продольной координаты). С другой стороны, утолщение пограничного слоя приводит к постепенному уменьшению длины потенциального ядра — области, лежащей между внутренними границами пограничного слоя.

На всем протяжении основного участка струи пульсации продольной скорости на оси превышают пульсации поперечной скорости. С ростом скорости спутного потока как пульсации продольной, так и пульсации поперечной скорости уменьшаются. Интенсивность турбулентности, отнесенная к местной средней скорости, возрастает с удалением от сопла. Среднеквадратичные значения пульсаций скорости на оси струи с удалением от сопла вначале возрастают (примерно до $x/d_a = 10 \div 14$), а затем медленно уменьшаются, причем местоположение максимума пульсаций с ростом параметра спутности отодвигается от среза сопла. Такой характер изменения интенсивности пульсаций

С удалением от среза сопла толщина слоя смешения непрерывно растет вдоль по потоку, и в конце начального участка слой смешения занимает все сечение струи (он имеет размер порядка диаметра сопла d_a).

Уширение струи на основном участке (так же как и расширение пограничного слоя на начальном участке турбулентной струи) зависит от разницы скорости на оси струи и скорости внешнего потока. Для турбулентных струй сжимаемого газа углы расширения границ слоя перемешивания струи тем больше, чем меньше параметр спутности и больше степень подогрева и чем меньше число Маха на срезе сопла. Толщина струи

вдоль оси струи обуславливается предысторией течения (структурой поля пульсационной скорости на начальном участке струи).

Ширина струи, определенная по затуханию пульсаций скорости, превышает ширину струи, определенную по затуханию продольной составляющей избыточной осредненной скорости, что связано с эффектом перемежаемости турбулентного потока.

Универсальность профилей средней скорости обнаруживается в затопленной круглой струе при $x/d_a = 12 \div 15$, а соответствующая универсальность профилей пульсационных скоростей устанавливается при $x/d_a \geq 30 \div 50$.

Наличие спутного потока усиливает влияние пограничных слоев на начальные профили искомых характеристик течения, поскольку к слою, нарастающему на внутренней стенке сопла, добавляется пограничный слой, нарастающий снаружи. Пограничные слои на внутренних и внешних стенках сопла приводят к неравномерности и немонотонности начальных профилей скорости, температуры и характеристик турбулентности, что сопровождается повышенным уровнем турбулентности и турбулентной вязкости, приводя к более интенсивному смешению струи с окружающей жидкостью по сравнению с равномерными профилями искомых параметров [3].

В плоской и осесимметричной турбулентных струях в спутном потоке подобие пульсационных скоростей не наблюдается, несмотря на то, что профили осредненной избыточной скорости являются практически универсальными.

При неоднородном распределении параметров потока на срезе сопла введение начального и переходного участков теряет смысл, поскольку граница между начальным и переходным участками определяется по началу изменения параметров на оси струи. В струе с неоднородными начальными профилями газодинамических параметров на срезе сопла их изменение вдоль оси струи происходит из-за турбулентного перемешивания внутренних слоев.

Деление дозвуковой струи на начальный, переходный и основной участки используется в ряде полуэмпирических методов расчета для сокращения объема вычислений при построении решения.

В работах [3, 95] для начального и основного участков струи строится приближенное решение, основанное на предположении об универсальности профилей дефекта скорости и избыточной температуры торможения в поперечных сечениях. Исходные уравнения основываются на полуэмпирической теории свободной турбулентности Тэйлора. Применение находит метод эквивалентной задачи теории теплопроводности, в котором уравнения движения тем или иным способом сводятся к уравнениям теплопроводности [57]. Хотя метод не имеет строгого обоснования и относится к числу приближенных полуэмпирических методов расчета, он позволяет получить решение задачи о непрерывной деформации профиля скорости в затопленной струе, вытекающей из сопла конечных размеров с произвольным начальным распределением

скорости. Другая группа интегральных методов основывается на использовании интегральных условий сохранения нулевых и высших моментов, полученных из обобщенных интегральных соотношений [58].

Для расчетов турбулентных струй газа используется подход, основанный на расчетах характеристик соответствующих струй несжимаемой жидкости (введение эквивалентной струи несжимаемой жидкости, гипотеза универсальности эжекционных свойств).

Численные методы позволяют рассчитывать непрерывную деформацию профилей газодинамических параметров вниз по потоку, не требуя деления струи на участки. В качестве исходного сечения для дозвуковых струй принимается срез сопла (начальное сечение изобарического участка), а изобарическая турбулентная зона смешения рассматривается как единая область.

1.2.3. Сверхзвуковая струя. Сверхзвуковая неизобарическая турбулентная струя представляет собой сложный газодинамический объект и характеризуется сильной пространственной неоднородностью полей скорости и давления, которая обуславливается наличием системы скачков уплотнения и сдвиговых слоев с большими градиентами скорости. Пространственная неоднородность потока способствует развитию неустойчивости, приводящей к интенсивным пульсациям скорости и давления, а формирование цепи обратной связи — к развитию автоколебаний, в результате которых в спектрах пульсаций появляются интенсивные дискретные составляющие [59].

В случае, когда давление в сверхзвуковой струе на срезе сопла p_a отличается от давления в окружающей атмосфере p_∞ , струя называется нерасчетной, и к числу параметров, характеризующих течение в струе, добавляется нерасчетность истечения $n = p_a/p_\infty$, определяющая картину ударных волн в струе и во внешнем пространстве. При сверхзвуковых скоростях истечения из сопла давление на выходе не зависит от давления в окружающей среде, поэтому нерасчетность истечения принимает любые значения, как меньшие единицы (на режиме перерасширения), так и большие единицы (на режиме недорасширения). При этом различают три режима: $n = 1$ — расчетный режим, $n < 1$ — режим перерасширения и $n > 1$ — режим недорасширения.

Модельные схемы струи отличаются от действительного течения, которое значительно сложнее, однако на их основе удается создать методики расчета, позволяющие с достаточной степенью точности определить поля скорости, температуры и концентрации в струе и в окружающей среде.

Схема течения в сверхзвуковой изобарической расчетной спутной струе такая же, как и в дозвуковой струе. Скорость течения на оси изобарической струи остается постоянной в пределах начального (изоэнтропического) участка течения, а в дальнейшем монотонно изменяется, стремясь к значению скорости в окружающем пространстве.

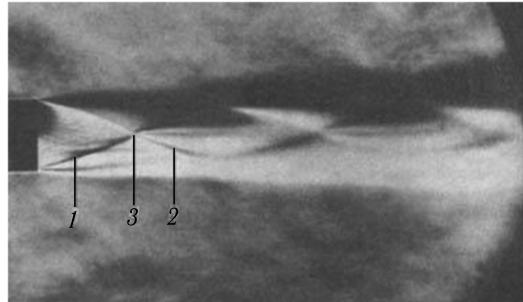


Рис. 1.3. Теневая фотография осесимметричной сверхзвуковой нерасчетной затопленной струи: 1 — висячая ударная волна, 2 — отраженные ударные волны, 3 — область отражения ударных волн

В реальной нерасчетной струе, показанной на рис. 1.3, в результате отражения ударных волн наблюдается несколько бочек, которые заполняют всю длину невязкого течения вблизи оси струи, а иногда выходят за ее пределы. В большинстве расчетных методик обычно рассматривается только первая бочка, поскольку она содержит наиболее интенсивные ударные волны, а дальнейшее течение считается изобарическим [69, 70].

Неравенство давлений на срезе сопла и в окружающей атмосфере усложняет картину течения в сверхзвуковой турбулентной струе, истекающей в покоящуюся среду (затопленное пространство) или в спутный поток. В такой струе возникают сложные газодинамические процессы, связанные с выравниванием давления в струе и в окружающей среде (при $n \neq 1$) и турбулентным перемешиванием в зонах тангенциальных разрывов газодинамических параметров. Расширение ($n > 1$) или сжатие ($n < 1$) струи сопровождаются появлением характерной волновой структуры, которая хорошо видна на теневых фотографиях сверхзвуковых затопленных струй воздуха, приведенных на рис. 1.4 (недорасширенная струя, $n > 1$), рис. 1.5 (перерасширенная струя, $n < 1$) и рис. 1.6 (расчетная струя, $n = 1$). На режимах, близких к расчетным, хорошо видны несколько бочек (под θ_a понимается угол наклона контура сопла в выходном сечении).

На нерасчетных режимах истечения сверхзвуковая затопленная струя характеризуется системой скачков уплотнения на ее газодинамическом участке. Ударно-волновые процессы сопровождаются резкими изменениями газодинамических параметров, в частности, взмывами и падениями замеряющего трубкой Пито давления торможения. Наличие близкой к периодической системы скачков уплотнения на газодинамическом участке сверхзвуковых нерасчетных струй приводит к волнобразному изменению полного давления вдоль оси струи. За начальным газодинамическим участком следует переходной участок, а затем основной участок с изобарическим течением и максимумом

^{2*}