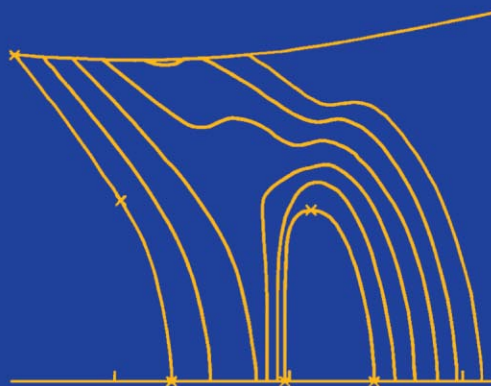
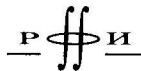


А. В. ЧИРИХИН

**ТЕЧЕНИЕ
КОНДЕНСИРУЮЩИХСЯ
И ЗАПЫЛЕННЫХ СРЕД
В СОПЛАХ
АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ
ТРУБ**



УДК 532.525
ББК 22.253,3
Ч 65



*Издание осуществлено при поддержке
Российского фонда фундаментальных
исследований по проекту 10-08-07055*

Чирихин А. В. Течение конденсирующихся и запыленных сред в соплах аэродинамических труб. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. — 280 с. — ISBN 978-5-9221-1347-2.

В книге разработаны вопросы подобия, модели релаксационных процессов, средства численного воспроизведения повышенной надежности и проведены комплексные исследования стационарных и нестационарных течений с конденсацией и высокотемпературной релаксацией однокомпонентных газов, влажного воздуха и запыленных сред в типичных соплах аэродинамических труб в диапазоне параметров торможения, обеспечивающих сохранение химического состава рабочей среды, и диапазоне чисел Маха от трансзвуковых до гиперзвуковых. Особое внимание уделено случаям сложного пространственного взаимодействия структуры газодинамического поля и релаксации. Рассмотрены некоторые вопросы экспериментального исследования и применения переохлажденных и колебательно неравновесных потоков для задач аэродинамического моделирования.

Книга предназначена специалистам в данной области.

*Посвящаю эту книгу
дорогим и горячо любимым жене Вере и сыну Андрею,
без помощи и содействия которых она не была бы
написана*

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	7
Принятые обозначения	12
Глава 1. Подобие и корреляция течений с конденсацией и колебательной релаксацией.	14
§ 1.1. Основные определения применительно к течениям с конденсацией и колебательной релаксацией	14
§ 1.2. Гомофазная модель среды в задаче о спонтанной конденсации	18
§ 1.3. Подобие и моделирование течений со спонтанной конденсацией	24
§ 1.4. Энтропийная корреляция скачков конденсации	32
§ 1.5. Подобие и корреляция течений с колебательной релаксацией	42
Глава 2. Феноменологические модели неравновесной конденсации потока в аэродинамических трубах.	47
§ 2.1. Конденсация и колебательная релаксация в гиперзвуковых течениях азота	48
§ 2.2. Гетерогенно-гомогенная конденсация переохлажденного потока	59
§ 2.3. Неравновесная конденсация воздуха в соплах гиперзвуковых аэродинамических труб	71
Глава 3. Одномерное приближение некоторых задач численного моделирования стационарных и нестационарных релаксирующих течений.	77
§ 3.1. Возбуждение автоколебаний при неравновесной конденсации трансзвуковых течений криогенного азота	78
§ 3.2. Энтропийная корреляция автоколебательных течений спонтанно конденсирующегося газа	85
§ 3.3. Нестационарное истечение релаксирующего газа из разрядной камеры в сопло с противодавлением	91
§ 3.4. Формирование течения при импульсном подводе энергии к струйке тока, моделирующей проточную часть коаксиального подогревателя	95
§ 3.5. О применении схемы Мак-Кормака для численного моделирования нелинейных явлений при распространении плоской звуковой волны в каналах	101
§ 3.6. О воздействии звуковых волн на неравновесную конденсацию водяного пара при течении влажного воздуха в сопле Лавалья	110
§ 3.7. Газодинамические особенности спонтанной конденсации в нестационарной волне разрежения	116
Глава 4. Двумерные трансзвуковые течения релаксирующего газа.	122
§ 4.1. Два варианта схемы Мак-Кормака для расчета осесимметричных течений с равномерной аппроксимацией второго порядка в радиальном направлении	123

§ 4.2. Адаптация схемы Мак-Кормака к расчету автоколебаний, инициированных спонтанной конденсацией	133
§ 4.3. Неравновесная конденсация водяного пара в трансзвуковых аэродинамических трубах	142
§ 4.4. Инженерные методы оценки состояния течений влажного воздуха в трансзвуковых трубах.	149
§ 4.5. Спонтанная конденсация криогенного азота в плоских соплах Лавалья . . .	156
§ 4.6. Некоторые особенности трансзвуковых течений релаксирующего азота . .	163
Глава 5. Двумерные релаксирующие течения в соплах гиперзвуковых аэродинамических труб.	174
§ 5.1. Два численных алгоритма решения прямой задачи двумерных течений релаксирующего газа в сопле Лавалья.	174
§ 5.2. Интегральный учет влияния пограничного слоя при расчете неравновесных течений азота в конических и профилированных соплах	182
§ 5.3. Особенности газодинамического проявления спонтанной конденсации в конических и профилированных соплах	188
§ 5.4. Методика расчета границ слабо сконденсированного состояния потока в гиперзвуковых профилированных соплах.	193
Глава 6. Некоторые вопросы течения запыленных сред в соплах аэродинамических труб	200
§ 6.1. Уравнения динамики запыленной конденсирующейся среды	201
§ 6.2. Корреляция слабо запыленных течений с неизменяющимися частицами в сверхзвуковых соплах.	204
§ 6.3. Релаксация сверхзвукового запыленного потока с неизменяющимися частицами за прямой ударной волной	212
§ 6.4. Неравновесные течения влажного запыленного воздуха в сопле крупномасштабной трансзвуковой аэродинамической трубы	216
§ 6.5. Испарение кварцевых частиц за сильными ударными волнами в слабо запыленном воздухе	219
§ 6.6. Испарение кварцевых частиц за сильными ударными волнами в слабо запыленном углекислом газе	227
Глава 7. Вопросы экспериментального исследования и применения переохлажденных и неравновесных потоков	235
§ 7.1. Оптические методы регистрации скачков конденсации и параметров конденсированной фазы	236
§ 7.2. Применение трубки Пито и термоанемометра для диагностики конденсации сверхзвуковых потоков	242
§ 7.3. Обтекание тонкого затупленного конуса переохлажденным потоком.	248
§ 7.4. Влияние неравновесности колебаний в набегающем потоке на обтекание тел типичной формы	252
Заключение.	261
Список литературы	265

A. W. Chirikhin

**Flow of condensing and dusty mediums in the nozzles
of aerodynamic tunnels**

In the monography questions of similarity are considered, models relaxation processes are formulated and algorithms of numerical reproduction of internal flows of increased reliability are developed. Complex researches of stationary and non-stationary flows with condensation and a high-temperature relaxation of unicomponent gases, humid air and dusty mediums in typical nozzles of aerodynamic tunnels are carried out. Ranges of the stagnation parameters, providing preservation of a chemical compound of a working mediums, and Mach numbers from transonic up to hypersonic are considered. The special attention is given to cases of complex spatial interaction of gas dynamic field structure and relaxation. Some questions of an experimental research and application of overcooled and vibrational nonequilibrium streams for problems of aerodynamic modeling are considered.

Contents

The foreword	7
The accepted designations	12
Chapter 1. Similarity and correlation of the flows with condensation and relaxation	14
§ 1.1. The basic definitions with reference to the flows with condensation and vibrational relaxation	14
§ 1.2. Homophase model of medium in the problem of spontaneous condensation	18
§ 1.3. Similarity and modelling of the flows with spontaneous condensation	24
§ 1.4. Entropy correlation of the condensation shocks	32
§ 1.5. Similarity and correlation of the flows with vibrational relaxation...	42
Chapter 2. Phenomenological models of nonequilibrium condensation of the stream in wind tunnels	47
§ 2.1. Condensation and vibrational relaxation in the hypersonic flows of Nitrogen	48
§ 2.2. Heterogeneous-homogeneous condensation of the supercooled flow...	59
§ 2.3. Nonequilibrium condensation of air in the nozzles of hypersonic wind tunnels	70
Chapter 3. One-dimensional approximation of some tasks of stationary and non-stationary relaxing flows numerical modelling	77
§ 3.1. Excitation of self-oscillations under nonequilibrium condensation of cryogenic nitrogen transonic flows	78
§ 3.2. Entropy correlation of self-oscillatory flows of spontaneously condensed gas	85
§ 3.3. Non-stationary relaxing gas expiration from the discharge chamber in the nozzle with backpressure	91
§ 3.4. Flow formation at an energy pulse supply to the stream jet, modelling a coaxial heater flowing part	95
§ 3.5. About MacCormak's scheme application for the nonlinear phenomena numerical modelling at the flat sound wave motion in channels ..	101
§ 3.6. About sound waves influence on nonequilibrium water vapor condensation at the damp air flow in Laval nozzle	110

§ 3.7. Gasdynamics features of spontaneous condensation in the non-stationary rarefaction wave	116
Chapter 4. Two-dimensional transonic flows of relaxing gas	122
§ 4.1. Two variants of the MacCormak's scheme for axisymmetric flows calculation with uniform approximation of the second order in a radial direction	123
§ 4.2. Adaptation of the MacCormak's scheme to calculation of self-oscillations, initiated by spontaneous condensation	133
§ 4.3. Nonequilibrium condensation of water vapor in the transonic wind tunnels damp air flows	142
§ 4.4. Engineering methods of a damp air flows condition estimation in the transonic wind tunnels	149
§ 4.5. Spontaneous condensation of cryogenic nitrogen in the flat Laval nozzles	156
§ 4.6. Some features of the relaxing nitrogen transonic flows	162
Chapter 5. Two-dimensional relaxing flows in the nozzles of hypersonic wind tunnels	174
§ 5.1. Two numerical algorithms of the decision of a direct problem of two-dimensional relaxing gas flows in the Laval nozzle	174
§ 5.2. The integrated account of a boundary layer influence in process of nitrogen nonequilibrium flows calculation in conic and contoured nozzles	182
§ 5.3. Features of the spontaneous condensation gasdynamic display in conic and contoured nozzles	187
§ 5.4. A design procedure of borders weakly condensed conditions of a stream in hypersonic contoured nozzles	193
Chapter 6. Some questions of dusty environments flows in the wind tunnels nozzles	200
§ 6.1. The equations of dusty condensed environment dynamics	201
§ 6.2. Correlation of weakly dusty flows with steady particles in the supersonic nozzles	204
§ 6.3. Relaxation of the supersonic dusty stream with steady particles behind a direct shock wave	212
§ 6.4. Nonequilibrium flows of damp dusty air in the nozzle of large-scale transonic wind tunnel	215

§ 6.5. Evaporation of quartz particles behind strong shock waves in weakly dusty air	218
§ 6.6. Evaporation of quartz particles behind strong shock waves in weakly dusty carbonic gas	226
Chapter 7. Questions of the experimental research and application of the overcooled and nonequilibrium streams	235
§ 7.1. Optical methods of the condensation shocks and condensed phase parameters registration	236
§ 7.2. Application of the Pito tube and hot-wire anemometer for the supersonic streams condensation diagnostic	242
§ 7.3. A flow of the thin blunted cone by the overcooled stream	248
§ 7.4. Influence of the vibration non-equilibrium state in the incident stream on flow of the typical form bodies	251
The literature	264

ПРЕДИСЛОВИЕ

Современная экспериментальная база аэродинамики представлена обширным арсеналом аэродинамических и газодинамических труб, предназначенных для решения широкого круга задач моделирования условий реального обтекания летательных аппаратов. При этом функционирование экспериментальной базы в свою очередь связано с проявлением тех или иных свойств реального газа, которые могут обусловить отличие состояния рабочей среды от состояния атмосферы в полете. В результате возникает проблема исследования особенностей функционирования экспериментальной базы в условиях проявления свойств реального газа и вопросы о том, насколько подобные отличия допустимы при постановке конкретных задач моделирования. При решении сформулированной проблемы приобретает актуальность разработка средств математического моделирования аэрофизических процессов, определяющих функционирование экспериментальной базы, инженерных методов обработки и представления информации, а также соответствующих средств диагностики течений.

Одним из характерных примеров проявления свойств реального газа в аэродинамических трубах является частичная конденсация рабочей среды или ее компонентов. С этим явлением экспериментаторы столкнулись при реализации еще сравнительно небольших сверхзвуковых скоростей потоков воздуха, обнаружив присутствие в районе критического сечения сопла Лавалья возмущений, подобных скачкам уплотнения. Систематические исследования, предпринятые Германом [190], показали, что появление возмущений обусловлено локализованным подводом теплоты парообразования при конденсации содержащихся в воздухе паров воды. Первые отечественные работы в данном направлении были проведены в 1944 г. в ЦАГИ В. А. Андреевым и С. З. Беленьким [4, 10]. В работе [39] Даум и Дъармати собрали экспериментальные данные большого числа авторов по конденсации азота и воздуха в соплах различной конфигурации. В ЦАГИ систематическое изучение конденсации потока в соплах аэродинамических труб было заложено работами В. Е. Попова [93, 94], М. В. Родина и ряда других исследователей.

Конденсация основных компонент рабочей среды изменяет ее теплофизическую структуру и, таким образом, ограничивает допустимые пределы расширения потока и диапазоны изменения параметров торможения. С позиции термодинамического равновесия началу конденсации соответствуют условия насыщения, причем в этом случае необходимо наличие поверхностей для отложения конденсированной фазы. Если подобные поверхности отсутствуют, то при последующем расширении состояние среды будет сохраняться некоторое время метастабильным (переохлажденным). После достижения критической величины переохлаждения (точки Вильсона) разрушение метастабильного состояния произойдет за счет так называемой спонтанной конденсации.

Значительный вклад в понимание физики неравновесной конденсации был сделан Осватичем [195], который ввел в аэродинамику модель спонтанного образования гомогенных ядер конденсации (теорию нуклеации). Обзоры работ по данному вопросу можно найти в [120, 136].

Следующим этапом образования новой фазы являются процессы роста и испарения капель, которые рассмотрены в монографиях [3, 137]. Формирование конденсированной фазы в целом описывается кинетическим уравнением для функции распределения капель конденсата по размерам. При этом методика расчета течений с использованием функции распределения подробно изложена в [34]. В случае, когда скорость роста капель не зависит от их размера, кинетическое уравнение можно проинтегрировать и получить три обыкновенных дифференциальных уравнения для моментов функции распределения, которые впервые использованы в [191]. Некоторые новые подходы к решению данной задачи изложены в [14].

При практическом применении классической теории конденсации ее, как правило, корректируют по результатам конкретных экспериментальных исследований. Подобную коррекцию осуществляют, вводя в уравнение нуклеации и в соотношения для скорости роста капель соответствующие коэффициенты, полученные при обработке экспериментов [8, 38, 103, 191, 201], или соответствующим образом подбирают теплофизические параметры конденсированной среды [180, 203, 205, 207]. В результате удается обеспечить достаточную точность прогнозирования максимального переохлаждения течений конкретных газов или параметры точки Вильсона.

Важность получения достоверных данных о допустимых уровнях переохлаждения очевидна, поскольку появляется возможность снизить величину предварительного подогрева по сравнению с необходимой для реализации ненасыщенного состояния потока во всем поле течения. Это открывает пути для повышения чисел Рейнольдса, расширения рабочих диапазонов экспериментальных установок и экономии определенных количеств энергии.

При реализации больших сверхзвуковых чисел Маха ($M \sim 15-25$) с состоянием рабочего газа, например, азота на пороге конденсации и при условии отсутствия химических превращений необходимо располагать возможностью соответствующего повышения температуры торможения, уровни которой могут составлять значения от 1500 до 3000 К. При таких температурах в молекулах азота будет происходить возбуждение колебаний атомов, а энергия колебаний может составлять $\sim 20\%$ от энтальпии торможения. В результате колебательная релаксация может оказать влияние как на параметры течения в рабочей части аэродинамической трубы, так и на обтекание моделей.

В указанных условиях для описания колебательной релаксации азота применима модель гармонического осциллятора с уравнением релаксации в форме Ландау–Теллера [51, 121] и учетом влияния ангармоничности согласно рекомендациям [76]. Для течений воздуха применима модель колебательно-го энергообмена, предложенная в [61] или интегральная модель [210]. В свою

очередь, материалы работ [17, 29, 63] свидетельствуют о взаимном влиянии конденсации и колебательной релаксации в течениях оптически активных сред.

Атмосфера Земли и планет может содержать мелкодисперсную пыль, выносимую на значительные высоты посредством различных естественных и техногенных процессов. Анализ публикаций по данному вопросу, приведенный в [214], показал, что в равновесных условиях в атмосфере, например, Марса могут находиться частицы с размерами $(0,1-20) \cdot 10^{-6}$ м и концентрацией порядка долей процента. Присутствие частиц пыли может оказать определенное воздействие на обтекание летательных аппаратов, характерные проявления которого целесообразно исследовать в лабораторных условиях и численно, прежде чем с этими явлениями придется столкнуться в реальном полете. Изложенные обстоятельства определяют актуальность вопросов о реализуемости в существующих гиперзвуковых аэродинамических трубах квазиравновесных течений газопылевых сред, необходимых для моделирования движения в запыленной атмосфере, а также анализе условий подобия и корреляции таких течений.

Аэродинамические трубы комплектуются профилированными соплами, предназначенными для формирования равномерного потока с заданным значением числа Маха в характеристическом ромбе. При больших значениях числа Маха передняя вершина характеристического ромба будет располагаться глубоко внутри сопла. Именно вблизи этой точки и несколько выше по потоку будет формироваться скачок конденсации и происходить локализованное выделение теплоты фазового перехода при соответствующем понижении температуры торможения. Подобное тепловыделение будет приводить к образованию локальных зон торможения потока и нарушению изоэнтропичности течения в целом.

В данном случае адекватная интерпретация эволюции течения и, в частности, его статических параметров возможна только на основе прямого численного моделирования с использованием алгоритмов и моделей физических процессов, прошедших соответствующую предварительную апробацию. Адекватность подобной интерпретации можно гарантировать путем параллельного применения двух пакетов программ, имеющих различную математическую основу и практическую реализацию. Подобные программные средства должны рассматриваться как необходимый инструмент сопровождения традиционного аэродинамического эксперимента.

Для описания движения двухфазных потоков в соплах в настоящее время широко используется модель взаимно проникающих континуумов, на основе которой выполнено значительное количество работ, а их перечень имеется в [54]. Среди подобных публикаций необходимо отметить монографии М. Е. Дейча и Г. А. Филиппова [41], Г. А. Салтанова [101, 103], С. Соу [116], Л. Е. Стернина [119], В. Н. Горбунова, У. Г. Пирумова, Ю. А. Рыжова [34], А. Д. Рычкова [98], которые явились настольными книгами автора на протяжении всего периода работы по сформулированной проблеме.

Аналогичную роль сыграли монографии Е. В. Ступоченко, С. А. Лосева, А. И. Осипова [121], Я. Б. Зельдовича и Ю. П. Райзера [51], В. П. Агафонова, В. К. Вертушкина, А. А. Гладкова и О. Ю. Полянского [1], С. А. Лосева [76], посвященные неравновесным физико-химическим процессам в аэродинамике и гиперзвуковым течениям реального газа.

Книга состоит из семи глав, объединенных последовательным и единообразным подходом к анализу условий реализации в соплах сверхзвуковых и гиперзвуковых аэродинамических труб метастабильного (переохлажденного) и слабо сконденсированного состояний рабочей среды, представленной однокомпонентными газами и атмосферным воздухом различной влажности и запыленности и квазиравновесных состояний слабо запыленного воздуха.

В главе 1 сформулирована математическая модель двухфазной среды применительно к начальной стадии конденсации, выполнен ее газодинамический анализ и конкретизированы релаксационные процессы, определяющие неравновесное течение при условии сохранения химического состава. Рассмотрены вопросы о точном и приближенном подоби и моделировании течений смеси из инертного разбавителя и конденсирующейся примеси в каналах произвольной формы. Сходные вопросы рассмотрены применительно к течениям с колебательной релаксацией.

Глава 2 посвящена разработке моделей неравновесной конденсации конкретных рабочих сред гиперзвуковых аэродинамических труб. Сформулированы модели взаимосвязанного протекания спонтанной конденсации и колебательной релаксации высокоэнтальпийных течений, гетерогенно-гомогенной конденсации при произвольном распределении по размерам гетерогенных частиц и неравновесной конденсации воздуха.

Глава 3 посвящена применению одномерного приближения в качестве инструмента предварительного исследования стационарных и нестационарных релаксирующих течений. Рассмотрены вопросы: о возникновении в трансзвуковых течениях азота автоколебательных режимов, инициированных сверхкритическим выделением теплоты фазового перехода, о нестационарном истечении релаксирующего азота из разрядной камеры импульсной трубы в сопло с противодавлением и о переходных процессах при импульсном подводе энергии к струйке тока, моделирующей проточную часть коаксиального дугового подогревателя. Проанализированы особенности численного моделирования нелинейных явлений при распространении плоской звуковой волны в каналах, вопросы воздействия звуковых волн на процесс спонтанной конденсации в сопле Лаваля и газодинамические особенности спонтанной конденсации в нестационарной волне разрежения.

Глава 4 посвящена анализу особенностей применения и практическому использованию двух вариантов явной схемы Мак–Кормака в задачах численного моделирования стационарных и нестационарных течений релаксирующих сред в трансзвуковой зоне плоских и осесимметричных сопел Лаваля. Проведена адаптация данной схемы к расчету автоколебательных режимов,

инициированных спонтанной конденсацией. Рассмотрен вопрос о взаимодействии колебательной релаксации азота и структуры газодинамического поля в трансзвуковой зоне осесимметричных сопел Лавалья.

Глава 5 посвящена разработке, тестированию и параллельному применению двух пакетов программ численного моделирования течений релаксирующих сред в двумерных соплах гиперзвуковых аэродинамических труб, один из которых основан на явной схеме Мак–Кормака с равномерной аппроксимацией второго порядка в радиальном направлении, а второй — на модификации схемы Иванова–Крайко–Колгана. Сформулированы условия устойчивости переохлаждения азота в зоне равномерного течения профилированных сопел и разработана инженерная методика расчета границ слабо сконденсированного состояния потока.

Глава 6 посвящена анализу вопросов реализуемости в существующих гиперзвуковых аэродинамических трубах квазиравновесных течений газопылевых сред, необходимых для моделирования движения в запыленной атмосфере, условий подобия и корреляции таких течений. Рассмотрены задачи: о релаксации сверхзвукового запыленного потока с неизменяющимися частицами за прямой ударной волной, о испарении кварцевых частиц за сильными ударными волнами в слабо запыленном воздухе и углекислом газе, о влиянии запыленности на течение влажного воздуха в сопле крупномасштабной трансзвуковой аэродинамической трубы.

В главе 7 рассматриваются отдельные вопросы экспериментального исследования и практического применения слабо сконденсированных и неравновесных потоков. На основании полученных результатов сделан вывод о пригодности переохлажденных и колебательно замороженных течений для традиционных задач аэродинамического моделирования.

Основу книги составил переработанный текст диссертации «Стационарные и нестационарные течения релаксирующих сред в соплах аэродинамических труб», в которой обобщены и систематизированы результаты 25 лет исследований изложенной выше проблемы в Центральном аэрогидродинамическом институте имени проф. Н. Е. Жуковского (ЦАГИ). В книгу также вошли результаты исследований за последующие 15 лет.

Автор выражает благодарность за содействие данной работе: В. П. Верховскому, предоставившему численные данные по контурам профилированных гиперзвуковых сопел и экспериментальные данные по течениям влажного воздуха в сопле крупномасштабной АДТ, В. В. Мошарову, написавшему § 7.1, посвященный оптическим методам исследования газодисперсных потоков, Л. П. Вронской, изготовившей уникальный образец термоанемометра, М. В. Безменову, которым получены экспериментальные данные по скачкам конденсации с использованием этого термоанемометра и трубки Пито (§ 7.2), В. И. Благосклонову, И. К. Жуковой, Г. А. Салтанову и Г. П. Симановскому, предоставившим уникальные программные средства, а также С. Н. Арслановой.