



Math-Net.Ru

All Russian mathematical portal

V. A. Kirillin, Ё. Ё. Shpil'rain, Успехи советской теплофизической науки,  
*TVT*, 1967, Volume 5, Issue 5, 733–738

<https://www.mathnet.ru/eng/tvt6318>

Use of the all-Russian mathematical portal Math-Net.Ru implies that you have read and agreed to these terms of use

<https://www.mathnet.ru/eng/agreement>

Download details:

IP: 18.97.9.173

May 14, 2025, 18:37:38



# ТЕПЛОФИЗИКА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР

СЕНТЯБРЬ—ОКТЯБРЬ

1967

МОСКВА

Журнал основан в 1963 году

Выходит 6 раз в год

## УСПЕХИ СОВЕТСКОЙ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОЙ НАУКИ

Быстрое промышленное развитие нашей страны после Октябрьской революции и сопутствующий ему технический прогресс обусловили необходимость развития и отечественной науки. Еще до революции в России имелись всемирно известные научные школы в области термодинамики, термометрии, термохимии и др., но они были немногочисленны и не имели средств для широкого проведения научных исследований. Уже в первые годы Советской власти были созданы специальные научные учреждения — Всесоюзный теплотехнический институт в Москве и Центральный котлотурбинный институт в Ленинграде, явившиеся колыбелью отечественной теплотехнической науки. Получила новые возможности для развития научных исследований и высшая школа. В эти годы закладывались основы, позволившие впоследствии развить много новых научных направлений, одним из которых является и теплофизика высоких температур.

Характерной чертой советского периода развития науки, и в частности теплофизики, является тесная связь с практикой. Именно поэтому, когда в послевоенные годы стали интенсивно развиваться новые области техники, для большинства направлений которых характерна чрезвычайно большая интенсификация рабочих процессов, теплофизика высоких температур начала оформляться в самостоятельное направление. Это направление включило в себя многие вопросы термодинамики и молекулярно-кинетической теории, науки о теплообмене и гидродинамики, физики плазмы и магнитной гидродинамики, физической химии и физики твердого тела. Начала складываться и методология новой науки, представляющая собой сочетание тонких физических и физико-химических исследований с теоретическими обобщениями. Естественно, что теплофизика высоких температур могла развиваться только в тесном контакте со смежными областями знаний — соответствующей измерительной техникой, наукой о высокотемпературных материалах, физической оптикой и др.

Быстрому прогрессу теплофизики способствовало создание ряда новых специализированных институтов — Института теплофизики Сибирского отделения АН СССР, Института высоких температур АН СССР, Института технической теплофизики АН УССР. Крупные теплофизические отделы были сформированы также в ряде отраслевых научно-исследовательских институтов и опытно-конструкторских бюро.

В последнее время объем и научный уровень теплофизических исследований нарастают чрезвычайно быстро. Большие успехи достигнуты в обла-

сти исследования теплофизических свойств веществ. Если попытаться сформулировать здесь основные достижения последних лет, то прежде всего следовало бы отметить определенные достижения теории. Наибольший успех достигнут в области теории теплофизических свойств газов при высоких температурах. Выполнено много интересных работ по теории и методам расчета термодинамических свойств неидеальных газов, в том числе химически реагирующих газов при высоких температурах. Существенно продвинута теория коэффициентов переноса в химически реагирующих газах. Сделано много практически полезных расчетов потенциалов взаимодействий между различными атомами, в том числе между атомами одного и того же элемента, находящимися в различных электронных состояниях. Имеются большие успехи в теории жидкого состояния и прежде всего в области объяснения поведения веществ в критической области. Идея о характерных размерах корреляции для критической области оказалась весьма плодотворной и привела к ряду интересных следствий, которые заставляют по-новому подойти ко многим вопросам теории фазовых равновесий. Успешно развивались работы в области теории уравнений состояния веществ. В сочетании с ЭЦВМ разработан достаточно универсальный математический аппарат, позволяющий по небольшому количеству экспериментально измеренных величин, относящихся к различным свойствам вещества, составить его уравнение состояния.

Говоря о методах расчета с использованием вычислительной техники, нельзя не упомянуть о разработке в последнее время ряда интересных программ для вычисления статистических сумм атомов, для расчета составов химически реагирующих газовых смесей, для расчета их свойств и т. д.

Для экспериментальных работ в области изучения теплофизических свойств веществ в последние годы характерны по меньшей мере две особенности — стремление достичь как можно более высоких температур и все большее повышение точности соответствующих исследований. Как первое, так и второе, естественно, связано с новыми методическими разработками, и использованием новой экспериментальной и измерительной техники. Немаловажную роль играет и внедрение в обиход теплофизических лабораторий новых материалов — в качестве конструкционных элементов экспериментальных установок, в качестве нагревателей, оптических устройств и т. п. Большой интерес представляет обеспечение высоких температур с помощью электронного обогрева. Этому методу присущ ряд положительных особенностей, которые уже сейчас определили его внедрение в передовых лабораториях страны и, по-видимому, обеспечат еще более широкое применение в будущем. Среди этих особенностей прежде всего следует упомянуть возможность весьма большой концентрации мощности на малых поверхностях образцов (т. е. обеспечение чрезвычайно больших удельных тепловых потоков), «чистоту» системы — отсутствие каких-либо элементов конструкции, могущих загрязнить исследуемый образец, и, наконец, практически полная безынерционность, особенно полезная для всевозможных динамических методов исследований.

В самое последнее время начинают применять в технике теплофизических исследований лазеры, однако широкого распространения эта техника еще не получила.

Успехи металлургии тугоплавких металлов определили возможность применения в лабораторной практике конструкций из молибдена, ниобия, и вольфрама. Причем, если некоторое время назад эти металлы применялись только в виде простейших геометрий, то теперь из них можно делать весьма сложные узлы экспериментальных установок.

Большое значение для повышения точности исследований имели соответствующие успехи измерительной техники.

Основываясь на этих достижениях, в последнее время были проведены комплексные исследования теплофизических свойств большой гаммы высокотемпературных конструкционных материалов, тепловых и электро-

изоляторов до предельных температур их существования. Проведен большой объем экспериментальных и теоретических работ по исследованию теплофизических свойств жидкостей и, в частности, жидких металлов, представляющих собой перспективные теплоносители и рабочие тела. Получены новые важные результаты по составу и структуре молекул паров ряда веществ. Эти результаты дали возможность заново подойти к вопросу о расчете термодинамических функций ряда технически важных веществ.

Велики в последнее время достижения и в области теплообмена. Особенно интенсивно разрабатываются проблемы конвективного теплообмена. Это вызвано возникновением новых областей техники — ядерной энергетики, ракетной и космической техники, а также качественными сдвигами, происходящими в классических областях техники и, в частности, в теплоэнергетике.

В связи с новыми задачами были начаты широкие исследования в области конвективного теплообмена и динамики вязкой жидкости. В результате этих исследований получила дальнейшее развитие полуэмпирическая теория теплообмена при турбулентном движении жидкости; существенно продвинуто изучение вопросов теплообмена при ламинарном и турбулентном течении в трубах жидкостей с переменными физическими свойствами, что позволило разработать методы расчета теплообмена и сопротивления при высоких тепловых нагрузках, больших температурных напорах при околокритических параметрах состояния; получены обширные данные и разработаны методы расчета теплообмена при течении жидких металлов. Советские ученые внесли значительный вклад в теорию пограничного слоя, которая в настоящее время сформировалась в хорошо разработанную область знания. Пользуясь методами теории пограничного слоя и опираясь на экспериментальные данные, удалось исследовать сложные вопросы теплообмена и сопротивления при движении тела в атмосфере в широком диапазоне скоростей — от дозвуковых до высоких сверхзвуковых — при ламинарном и турбулентном пограничном слоях; изучаются процессы теплообмена при наличии химических реакций в пограничном слое и на поверхности тела, а также многие другие вопросы, связанные с проблемой движения тела в плотных слоях атмосферы. Наряду с упомянутыми вопросами значительное внимание уделяется изучению теплообмена при движении тел в разреженном газе как в случае свободно-молекулярного течения, так и течения со скольжением.

В послевоенные годы широко фронтом проводились исследования процессов теплообмена при кипении жидкости, конденсации пара и гидродинамики двухфазного потока. В этой области, в особенности по теплообмену при кипении и гидродинамике двухфазного потока, накоплен обширный экспериментальный материал, охватывающий широкий диапазон давлений, тепловых нагрузок и других режимных параметров. Получены опытные данные по теплообмену при кипении жидких металлов и при конденсации их паров. Достигнуты значительные успехи в изучении механизма процесса кипения и обобщения опытных данных; сделаны важные шаги по пути создания теории теплообмена при кипении.

В области теплообмена излучением весьма детально была исследована задача о теплообмене в системе, состоящей из произвольного (конечного) числа серых тел, разделенных прозрачной средой; изучены процессы переноса лучистой энергии в поглощающей и рассеивающей средах и системах, образованных этими средами и ограничивающими их серыми телами; разработаны зональные методы расчета теплообмена излучением; созданы полуэмпирические методы расчета лучистого теплообмена в топочных камерах котлов и печей.

Необходимо отметить достижения новой, быстро развивающейся области теплофизики — теплофизики низкотемпературной плазмы. Ее развитие стимулируется требованиями не только таких классических областей плазменной техники, как источники света, но и ракетной техники (аэродинами-

ческий нагрев летательных аппаратов при прохождении плотных слоев атмосферы, плазменные двигатели), плазмахимии. Особенно тесная связь существует между успехами теплофизики плазмы и проблемами прямого преобразования энергии.

Отмечая успехи физики низкотемпературной плазмы, необходимо прежде всего указать на существенный прогресс в разработке разнообразных источников низкотемпературной плазмы. В настоящее время является вполне реальной задача получения низкотемпературной плазмы в очень широком диапазоне изменений термодинамических параметров.

Успешно развивалась в последнее время диагностика низкотемпературной плазмы. Разработаны основы методов диагностики, определены области применимости различных методов. Важно указать, что современные диагностические средства прочно вошли в практику исследований низкотемпературной плазмы многих научных коллективов.

Разработка экспериментальных методов изучения низкотемпературной плазмы способствовала развитию ее теории, оказавшейся из-за большого числа элементарных процессов в ней не менее сложной, чем теория высокотемпературной плазмы. Весьма интересные результаты были получены советскими учеными в термодинамике и кинетике неравновесной плазмы. Интенсивно изучается оптика низкотемпературной плазмы.

Важный вклад внесли наши ученые в исследование явления неустойчивости низкотемпературной плазмы в магнитном поле, имеющего большое значение для проблемы прямого преобразования энергии. Получены теоретические и экспериментальные данные по электропроводности турбулентной плазмы в магнитном поле.

Широким фронтом начаты исследования явлений переноса в низкотемпературной плазме.

Значительны достижения в области разработки методов и приборов для измерения высоких температур. В этой связи следует упомянуть работы, проводившиеся в Центральной лаборатории автоматки (Москва). Наиболее известными работами этой организации явилось исследование и широкое внедрение вольфрам-молибденовых и вольфрам-ренийевых термопар для контактного измерения температур до  $2000^{\circ}\text{C}$ , а также конструкции серийно выпускающихся сейчас регистрирующих фотоэлектрических пирометров и радиационных пирометров с кварцевой оптикой и оригинальной системой термокомпенсации.

Широкую известность как в СССР, так и за рубежом получили автоматические фотоэлектрические цветовые пирометры, разработанные в Институте металлургии им. А. А. Байкова.

Во многих ведомственных исследовательских организациях и конструкторских бюро были успешно выполнены работы по созданию методов и средств измерения температур в специфических условиях: измерение температур газовых потоков и пламен, измерения при быстропотекающих процессах. К этой группе можно отнести разработанный в Харьковском институте мер и измерительных приборов оригинальный метод измерения температур пламен по абсолютной интенсивности спектральных линий, а также разработанные во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева основы методов измерения нестационарных температур сред в условиях меняющегося коэффициента теплоотдачи. Во ВНИИМ был предложен динамический метод измерения высоких температур, позволяющий по трем измеренным значениям ординат на кривой переходного режима термоприемника расчетным путем определить температуру среды, превышающую предельно допустимое значение рабочей температуры для данного термоприемника.

В Московском энергетическом институте разработаны методы измерения нестационарных температур в двигателях внутреннего сгорания. В ряде исследовательских организаций разработаны оригинальные образцы аппаратуры для исследования температур факела новых типов двигателей.

Вся широкая номенклатура приборов для измерения высоких температур, созданных в послевоенное время как в серийном производстве, так и в единичных опытных образцах, потребовала специальных средств для их градуировки и периодической поверки. Поэтому успех пирометрического приборостроения был бы невозможен без одновременного развертывания метрологических исследований в области температурных измерений. Необходимо было создать как более совершенные эталоны, охватывающие более широкий диапазон температур, чем ранее существовавшие, так и группы точных образцовых приборов, позволяющих осуществлять передачу правильных значений температур от эталонов к градуируемым рабочим приборам.

Во ВНИИМ проведены фундаментальные исследования по определению термодинамических температур основных реперных точек температурной шкалы и, в первую очередь, температуры затвердевания чистого золота — основы шкалы высоких температур. Эти исследования получили мировую известность.

Широкое распространение в разных областях техники получили прецизионные визуальные оптические пирометры ЭОП и ОП, разработанные в ХГИМИП. Там же были созданы уникальные объективные спектро-пирометрические установки, позволяющие с высокой точностью осуществлять сравнение температурных ламп в лучах различных длин волн спектра; они положены сейчас в основу эталонных работ в области высоких температур. Создана и внедрена в эксплуатацию платиновая нормаль, позволившая обеспечить единство измерений термоэлектрических свойств термоэлектродов термопар.

Созданный арсенал измерительных и градуировочных средств позволяет в настоящее время уверенно проводить температурные измерения с требуемой точностью в самых разнообразных условиях, встречающихся в теплофизических исследованиях.

Перечисляя большие успехи, достигнутые отечественной теплофизикой, следует также отметить и те основные задачи, которые еще ждут своего решения.

В области теплофизических свойств веществ это прежде всего проблемы надежного экспериментального определения свойств твердых тел при предельно высоких температурах, в частности для таких веществ, поведение которых зависит не только от параметров состояния, но и от среды, в которой они находятся. К таким веществам относятся соединения, которые при высоких температурах могут разлагаться с образованием газообразных продуктов. Большие задачи стоят перед теорией теплофизических свойств твердых тел, призванной облегчить проведение обоснованной интер- и экстраполяции свойств веществ. Необходимо и далее развивать вопросы теории теплофизических свойств газов при высоких температурах. Исследования в этой области должны развиваться в направлении теоретических методов расчета свойств газов, особенно в сложных случаях неидеальных химически реагирующих газов, в направлении определения потенциалов взаимодействия сложных молекул, в направлении расчета термодинамических функций веществ в идеально-газовом состоянии вблизи предела диссоциации и др. Экспериментальные работы в этой области должны ставиться с учетом получения необходимых данных для теоретических обобщений.

Велики задачи, стоящие перед наукой о теплообмене. В числе этих задач — разработка общей теории неравновесных процессов переноса энергии, вещества и количества движения, основанной на феноменологических представлениях (в частности, на методах термодинамики необратимых процессов) и использующей в тех случаях, когда это необходимо, методы статистической механики. Развитие теории неоднородной турбулентности, в первую очередь полумпирической, и с этой целью изучение структуры турбулентных течений и процессов турбулентного переноса количества

движения, тепла и вещества. Исследование влияния электрических и магнитных полей на процессы турбулентного переноса. Исследования процессов теплообмена потоков жидкости, газа и плазмы при наличии сильной зависимости физических свойств жидкости (газа, плазмы) от температуры и давления, при наличии в потоке и на стенке химических реакций и процессов ионизации как при стационарных, так и нестационарных условиях. Изучение гидродинамики и теплообмена в двухфазных потоках при наличии кипения конденсации, сублимации и т. д. при стационарных и нестационарных условиях. Развитие точных и приближенных методов решения нелинейных дифференциальных уравнений, интегральных и интегро-дифференциальных уравнений, описывающих процессы переноса. Разработка эвристик программирования.

В области физики плазмы наиболее интересными направлениями на ближайшее время, по-видимому, являются: разработка теории неравновесной низкотемпературной плазмы; исследование оптических и переносных свойств плазмы как в отсутствие, так и при наличии магнитного поля; создание методов расчета течений и теплообмена плазмы в различных аппаратах с учетом электрических и магнитных полей.

По каждой из названных проблем, а также по многим другим, здесь не отмеченным, в той или иной степени уже ведется работа. Важно, чтобы эти исследования углублялись и развивались, чтобы на них концентрировалось внимание научных коллективов и отдельных ученых.

Нет сомнений, что советские теплофизики успешно справятся с этими задачами.

*В. А. Кириллин, Э. Э. Шпильрайн*