

УДК 536

**ВКЛАД ОТЕЧЕСТВЕННЫХ УЧЕНЫХ
В ТЕОРИЮ ТЕПЛООБМЕНА**

А. И. ЛЕОНТЬЕВ

*Московский государственный технический университет
им. Н.Э.Баумана*

С 1950 г. после окончания Московского авиационного института я работал по распределению в Энергетическом институте им. Г.М. Кржижановского, в лаборатории термодинамики двухфазных потоков, и был непосредственным свидетелем и участником многих событий в этом центре теплообменной науки того времени. Я с удовольствием и благодарностью вспоминаю встречи и консультации с известными учеными, труды которых стали классическими и получили мировое признание, — академиками М.В. Кирпичевым, М.А. Михеевым, М.А. Стыриковичем, членами-корреспондентами АН А.С. Предводителевым, А.А. Померанцевым, М.П. Вукаловичем, профессорами К.Д. Воскресенским, З.Л. Миропольским, Ю.А. Суриновым, В.А. Баумом и многими другими. Большинство из них уже ушли из жизни, однако их достижения навечно вписаны в историю науки о теплообмене. В одной статье невозможно оценить вклад в теорию теплообмена всех отечественных ученых, поэтому я, как правило, рассматривал только те работы, которые получили признание мировой научной общестности и укрепили международный авторитет нашей науки о тепло- и массообмене.

Начало истории науки о теплообмене обычно связывают с работой И. Ньютона 1701 года, в которой он рассмотрел задачу о нагревании тела в потоке жидкости и ввел понятие о коэффициенте теплоотдачи. Рассматривая историю отечественной науки, следует иметь в виду, что в Россию наука пришла лишь в XVIII веке. Россия не участвовала в научной революции семнадцатого века. Например, идеи Коперника получили распространение у нас лишь в 1717 г., т.е. спустя 170 лет после их опубликования в Польше. Татаро-монгольское иго привело к упадку ремесленного производства, разрушению городов и гибели многих культурных ценностей. Если Лондонское королевское общество было создано в 1660 г., Прусская академия наук в 1700 г., Национальная академия наук Италии в 1603 г., то Петербургская академия наук была основана только 28 января 1724 г. В 1701 г. (начало истории науки о теплообмене) в России Петром I было создано первое научное учреждение — Московская навигацонная школа. В 1715 г. организуется Морская академия в Петербурге. Велика заслуга Петра I и в создании Российской академии наук. Он встречался с Исааком Ньютоном, посетил Академии наук Англии, Франции, Пруссии, вел переписку с Лейбницем, основателем Берлинской академии наук. У Петра I была идея создания Российской академии наук с активным привлечением иностранных ученых. Первый русский был избран академиком лишь через 20 лет после ее основания.

С 1741 г. в Российской академии приступил к научной деятельности М.В. Ломоносов. История отечественной теории теплообмена начинается с вы-

дающей работы М.В. Ломоносова “Размышления о причине теплоты и холода” 1749 г. [1]. В этой работе Ломоносов на основании логических рассуждений критикует признанную в те годы теорию теплорода и подтверждает свои выводы экспериментально. Как известно, Бойль в своих опытах обнаружил увеличение массы металла после прокаливания и объяснил это тем, что металл поглощает “теплород”. Ломоносов показал, что при окислении металла в запаянных сосудах масса сосуда не изменяется, а последнее является убедительным опровержением теории теплорода. Таким образом, Ломоносов был в одном шаге от открытия кислорода, которое было сделано Лавуазье спустя 30 лет после его работы. Труды российских ученых публиковались во французских журналах, и, по-видимому, Лавуазье был знаком с исследованиями Ломоносова. В 1744 г. Ломоносов доложил свою работу на совете российских академиков, который в основном состоял из приглашенных иностранных ученых. Интересно мнение этого научного сообщества о работе Ломоносова: “...Похвальное прилежание и желание г. адъюнта (М.В. Ломоносова) заняться теорией теплоты и холода, но нам кажется, что он слишком рано взялся за дело, которое, по-видимому, пока еще превышает его силы”. В 1747 г. рукопись Ломоносова была послана на отзыв Л. Эйлеру, который тогда еще не был членом Российской академии наук. Мнение выдающегося математика и механика позволило Ломоносову в 1749 г. опубликовать свою работу. Рецензия Эйлера заканчивается словами: “...Все сии сочинения не токмо хороши, но и превосходны. При сем случае я должен отдать справедливость г. Ломоносову, что он одарован самым счастливым остроумием для объяснения явлений физических и химических. Желать надобно, чтобы все прочие Академии были в состоянии показать такие изображения, которые показал г. Ломоносов”.

Историю развития теории теплообмена можно разделить на два периода.

1. С XVII до середины XIX столетия — разработка основных понятий и определений (температура, тепло, энергия, теплоемкость, скрытая теплота), кинетическая теория газов, первый и второй законы термодинамики.

2. С середины XIX столетия до наших дней — изучение процессов передачи тепла за счет теплопроводности, конвекции и радиации, создание основ теории тепло- и массообмена как раздела прикладной теплофизики.

Кроме Ломоносова, на первом этапе следует отметить выдающийся вклад в теорию механики жидкости и газа членов Петербургской академии наук академиком Д. Бернулли и Л. Эйлера.

Начало исследований в области калориметрии было положено работами академика Георга Вильгельма Рихмана (1711–1753 гг.). В конце XVIII столетия известный электротехник академик Василий Владимирович Петров (1761–1834 гг.) опубликовал работу по горению, в которой опровергал теорию теплорода (1801 г.). В работах академика Якова Дмитриевича Захарова (1765–1836 гг.) были продолжены исследования Г.В. Рихмана и разработаны методы калориметрии. Профессор Николай Александрович Львов известен как автор монографии о печном искусстве (1795 г.). Калорифер Львова, выполненный из железных труб, был первым эффективным поверхностным теплообменником. Существенный и общепризнанный вклад в аналитическую теорию теплопроводности внес Михаил Васильевич Остроградский (1801–1861 гг.). Не получив диплома в Харьковском университете вследствие подозрений в неблагонадежности, Остроградский продолжил учебу во Франции, где слушал лекции Коши, Лапласа и Фурье. По-видимому, под влиянием Ж. Фурье Остроградский стал интересоваться задачами теплопроводности и в 1826 г. представил в Парижской академии наук несколько работ, которые в 1831 г. в переработанном виде были опубликованы в записках Петербургской академии наук под названием “Заметки по теории теплоты”. В этих работах Остроградский обобщил метод разделения переменных, использованный Фурье для решения однородных задач нестационарной теплопроводности. В той же работе Остроградский вывел формулу преобразования тройного интеграла по

объему в двойной интеграл по поверхности (известна как формула Гаусса — Остроградского). Основная заслуга Остроградского заключается в том, что он впервые построил теорию теплопроводности для движущейся жидкости (1836 – 1838 гг.) [2], используя гипотезу для плотности теплового потока:

$$\bar{q} = -\lambda \text{grad } T + h\bar{w} . \quad (1)$$

В результате было получено дифференциальное уравнение энергии (уравнение Фурье — Остроградского):

$$\frac{dT}{d\tau} = a\nabla^2 T + \frac{q_v}{c_p \rho} . \quad (2)$$

(В зарубежной литературе оно называется уравнением Фурье — Пуассона.)

После возвращения в Россию в 1828 г. Остроградский был назначен адъюнктом Академии наук, а затем в 1830 г. избран академиком Петербургской академии наук.

Основным стимулом исследований в области теории теплообмена с середины XIX столетия послужило интенсивное развитие теплотехники. Первые паровые машины появились в начале XVIII века (Ньюкомен, Севери, Поппен), однако наиболее интенсивное их развитие началось после работ Д. Уатта, который разделил процессы парообразования, совершения работы и конденсации, что сделало эту машину универсальной и экономичной.

Первая отечественная двухцилиндровая паровая машина непрерывного действия была спроектирована и построена в городе Барнауле выдающимся русским мастером Иваном Ивановичем Ползуновым (1728–1766 гг.) практически одновременно с Д. Уаттом в 1765 г. Вся жизнь Ползунова является примером подвижничества и бескорыстного патриотического служения Отечеству. Именно к таким людям относятся слова А.П. Чехова: “Подвижники нужны как солнце. Составляя самый поэтический и жизнерадостный элемент общества, они возбуждают, утешают и облагораживают”. И.И. Ползунов родился на Урале, учился в “арифметической” школе, которая, будучи технической школой, готовила горнозаводских технологов на достаточно высоком уровне [3]. В школе преподавались математика, химия, механика, горное дело, гидротехника, черчение и пр. В 1742 г. Ползунов как хорошо успевающий ученик был взят в качестве “механического ученика” на Екатеринбургский завод, а в 1748 году назначен на Барнаульский завод на должность гитеншрейбера. По-видимому, там Ползунов познакомился с книгой П. Шлаттера “Обстоятельное наставление по рудному делу...”, где нашел схему пароватмосферной машины Ньюкомена. В 1763 г. Ползунов подготовил проект “огнедействующей машины” и подал его вместе с подробной объяснительной запиской начальнику Кольвано-Воскресенских заводов. Проект был поддержан и направлен в Петербург в правительственный кабинет, а затем представлен Екатерине II, которая активно поддержала планы молодого изобретателя. Ползунов был повышен в звании, и ему было пожаловано денежное вознаграждение.

К сожалению, об этом выдающемся соотечественнике сохранилось не так много фактических материалов, но даже из того, что имеется, следует: И.И. Ползунов был высокограмотный и образованный для своего времени человек, в чем нетрудно убедиться, прочитав его докладную записку по огнедействующей машине. Так, в разделе о теплоте И.И. Ползунов исключительно квалифицированно излагает существовавшие в то время воззрения на природу теплоты, отмечает разногласия между теорией теплорода и молекулярно-кинетической теорией и приходит к справедливому выводу, что “...ожидать тех пор, пока откроется правда, не нужно”. Он подчеркивал, что “...теория, а особенно в воздушных и огненных делах, бывает многим слабее практики”. Интересно отметить, что

Ползунов для изучения механизма выделения пара из кипящей воды проводил специальные наблюдения и пришел к выводам, которые звучат вполне современно. Цитирую: "Что касается до свойства паров из воды возрастающих, они состоят из пузырьков весьма мелких и, коло исходящей воздушной теплоты прильнув, растянуты бывають утлою скорлупою, которая их с собою ради полости до ровного с воздухом в тягости градуса вверх уносит и там содержит, доколе он не обредет, дозволяет (подобно, как тощий металловидный шар из воды сплывает), о которых в темной коморке сквозь маленькую дирку на пропуценном солнечном луче, по светлой дорожке (когда под ней вода кипит) через микроскоп всяк себе в доказательство представить может". Хочу напомнить, что это было 250 лет назад и вполне возможно вообще является первым научным описанием процесса теплообмена при кипении жидкости. Приложив неимоверные усилия, Ползунов создал первую в России паровую машину и навсегда увековечил свое имя первого русского теплотехника. Его именем названы Центральный котлотурбинный институт и Барнаульский политехнический институт, перед которым установлен памятник талантливому соотечественнику.

До последнего времени в Академии наук существовала премия И.И. Ползунова за выдающиеся работы в области теплотехники. К сожалению, по инициативе Отделения физико-технических проблем энергетики РАН эта почетная награда с непонятным мне рвением была ликвидирована. В 1998 г. исполнилось 270 лет со дня рождения И.И. Ползунова. Может быть, есть смысл пересмотреть это несправедливое решение.

Следует отметить, что машина Ползунова была изготовлена целиком из отечественных материалов и с использованием отечественных технологий. Машина была построена в 1765 г., но проработала только три месяца. Трагической явилась неожиданная смерть Ползунова за семь дней до запуска машины. К сожалению, инициатива Ползунова не была поддержана российскими правительством и предпринимателями, и дальнейшее развитие теплотехники в России осуществлялось за счет интенсивного импорта паровых машин из-за границы. Развитие собственного машиностроения тормозилось таможенной политикой правительства, не ограждавшей отечественную промышленность от импорта иностранной техники. Интересно в этой связи отметить, что в 1777 г. Д. Уатт по приглашению русского правительства собирался переехать в Россию. В этот период центром развития отечественной теплотехники стал Военно-морской флот России.

В 30-х гг. XIX столетия по предложению адмирала Ивана Федоровича Крузенштерна (1770–1846 гг.) было организовано преподавание курса паровых машин в офицерских классах Морского училища Корпуса корабельных инженеров [4]. Курс читал штабс-капитан Николай Николаевич Божерянов (1811–1876 гг.). Ему же принадлежит первая отечественная монография "Теория паровых машин", удостоенная престижной Демидовской премии.

В 1861 г., после отмены крепостного права, начинается интенсивное развитие отечественной промышленности и, в частности, массовое строительство парового военного флота России. К 1882 г. более половины паровых котлов России были отечественного производства. Возникла насущная необходимость в создании теории паровых котлов, теории теплообмена и в подготовке квалифицированных специалистов-теплотехников.

В создание теории паровых котлов выдающийся вклад внесли профессора Илья Павлович Альмов (1831–1884 гг.) и Иван Алексеевич Вышнеградский (1831–1895 гг.). Являясь выдающимся ученым и почетным членом Петербургской академии наук, Вышнеградский был в то же время известным государственным деятелем. Находясь с 1888 по 1892 г. на посту министра финансов, он в этом качестве стремился к развитию отечественной промышленности путем увеличения таможенных пошлин.

В 1864 г. опубликована работа Ильи Павловича Алымова “О тяги печи парового котла” [5], в которой указывается на ошибки известного французского ученого Пекле при выводе аналогичной формулы и впервые ставится вопрос о преимуществах искусственной тяги в паровых котлах. В известных работах профессора И.А. Вышнеградского [6] впервые сформулированы проблемы динамической устойчивости котла и предложена формула для скорости изменения давления при растопке котла.

В 1877 г. был опубликован “Курс паровых котлов” профессора Николая Павловича Петрова [7], основоположника гидродинамической теории смазки. Н.П. Петров, используя достаточно разработанную теорию теплопроводности и (первые) данные о теплоотдаче при движении газов, подробно анализирует условия теплопередачи в элементах котла и дает конкретные практические рекомендации для их проектирования. В работе Петрова приводится описание процесса кипения жидкости на поверхности теплообмена, которое вполне соответствует современным представлениям. Нельзя не отметить работы А.И. Предтеченского [8] и А. Погодина [9], которые стали основой теории циркуляции пароводяной смеси в паровых котлах.

Дальнейшее развитие теория паровых котлов получила в трудах профессоров Московского высшего технического училища (МВТУ) Александра Павловича Гавриленко (1861–1914 г.) [10], Карла Васильевича Кирша (1877–1919 г.) [11] и Василия Игнатьевича Гриневицкого (1871–1919 г.) [12]. В 1905 г. была опубликована работа В.И. Гриневицкого “Графический расчет парового котла” [12], получившая широкое признание. Автор впервые обратил внимание на зависимость коэффициентов теплоотдачи конвекцией и излучением от скорости газа и компоновки котла. Значимость этой работы заключалась и в том, что большинство практических рекомендаций обосновывались обширными экспериментальными исследованиями коэффициентов теплоотдачи, проведенными автором и его преемником К.В. Киршем. Эта работа справедливо считалась одной из лучших по методике теплового расчета котла вплоть до середины двадцатых годов XX столетия.

К концу XIX века большие достижения имело отечественное котлостроение. Знаменитые водотрубные котлы системы выдающегося российского инженера Владимира Григорьевича Шухова (1853–1939 г.) по многим показателям превосходили зарубежные аналоги. К 1917 г. в России эксплуатировали тысячи котлов системы Шухова [13].

Существенным является и вклад отечественных ученых в развитие теории конвективного теплообмена. Здесь прежде всего следует указать на известные работы профессора Московского государственного университета Николая Алексеевича Умова (1846–1915 г.). Вся жизнь Н.А. Умова была связана с МГУ, где он с 1893 г. возглавил кафедру физики и руководил ею до 1911 г., когда вместе с группой профессоров Николай Алексеевич покинул университет в знак протеста против нарушения царским правительством автономии МГУ. В 1874 г. [14] в своей докторской диссертации “Уравнение движения энергии в телах” Н.А. Умов, развивая идеи М.В. Остроградского, записал уравнение энергии в самом общем виде:

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \operatorname{div} \bar{\sigma} = 0, \quad (3)$$

где $\bar{\sigma} = T_{ik} \bar{v}$ — вектор потока энергии. Спустя 10 лет английский физик Пойнтинг ввел тот же вектор потока энергии в электромагнитных полях. Этот вектор потока энергии получил название вектора Умова — Пойнтинга. Новизна подхода Умова к описанию процессов переноса энергии явилась причиной одного отрицательного отзыва на его диссертацию, где были такие слова “...я в жизнь свою не читал такой галиматши”. Время все расставило по местам. Работы Н.А. Умова по-

лучили международное признание и заняли достойное место в теории теплообмена.

Следующий этап в развитии теории теплообмена в России связан с именем выдающегося теплофизика, академика Михаила Викторовича Кирпичева (1879–1955 гг.). В 1916 г. была опубликована статья Кирпичева “Новые идеи в области паровых котлов” [15], в которой впервые были сформулированы пути дальнейшего совершенствования котельных агрегатов на базе расширения исследований процессов теплообмена. Статья заканчивается так: “...дальнейший прогресс в расчете парового котла зависит от успешности экспериментального изучения котла, в частности от новых опытных данных о коэффициенте теплоотдачи”. Более поздние работы Кирпичева и его последователей по созданию теории моделирования тепловых процессов привели к созданию научной школы отечественных теплофизиков, получившей международное признание [16].

После Октябрьской революции, несмотря на разруху и голод, советское правительство понимало значимость науки для выживания молодого Советского государства. В 1918 г. специальным Указом, подписанным В.И. Лениным, было создано три научно-исследовательских института, ориентированных на изучение процессов теплообмена: Тепловая лаборатория в Физико-техническом институте (ныне им. А.Ф. Иоффе), Центральный котлотурбинный институт (ЦКТИ) и Всесоюзный теплотехнический институт (ВТИ).

Тепловую лабораторию в Физико-техническом институте возглавил М.В. Кирпичев. В лаборатории работали А.А. Гухман, Л.Г. Лойцянский, М.А. Михеев, Г.Н. Кружилин, В.А. Шваб — ученые, которые внесли большой вклад в теорию теплообмена и создали международный авторитет отечественной школы теплофизиков. В дальнейшем, когда Академия наук перебазировалась из Ленинграда в Москву, основные научные силы в области теплообмена сосредоточились в Энергетическом институте им. Г.М. Кржижановского АН СССР. Руководителем теплофизического отдела в ЭНИИе стал профессор М.В. Кирпичев. В состав отдела входило четыре лаборатории: конвективного теплообмена (руководитель М.А. Михеев), внутрикотловых процессов (руководитель М.А. Стырикович), термодинамики двухфазных сред (руководитель С.И. Костерин), радиационного теплообмена (Г.Л. Поляк, Ю.А. Суринов). Кроме того, в ЭНИИе были созданы отдел горения (руководитель А.С. Предводителев) и специальный отдел (руководитель Л.К. Рамзин).

Интенсивное развитие промышленности в СССР стимулировало проведение научно-исследовательских работ по теплообмену и расширение базы применения теории тепло- и массообмена. Создаются активно работающие коллективы теплофизиков в различных областях техники (авиация, строительство, космонавтика, атомная энергетика, пищевая промышленность, геофизика, электронная промышленность, металлургия, медицина, военно-промышленный комплекс и т. п.). Организуются академические и отраслевые институты теплофизического профиля в союзных республиках, многие из которых достигли высокого уровня и получили международное признание (например, Институт тепломассообмена в Минске, Институт технической теплофизики в Киеве, Институт физико-технических проблем энергетике в Каунасе и др.). Создаются мощные научные теплофизические центры для исследования проблем теплообмена в области ядерной энергетике (Институт атомной энергии в Москве, Физико-энергетический институт в городе Обнинске), ракетной техники (НИИТП в Москве), авиации (ЦАГИ и ЦИАМ в Москве). В 1957 г. было организовано Сибирское отделение АН СССР, в состав которого вошел Институт теплофизики. Его основной тематикой стало изучение процессов тепло- и массообмена в различных областях техники. Интересные коллективы ученых-теплофизиков создаются в ведущих вузах страны (МГУ, МЭИ и МАИ, ЛПИ и др.). Продолжают развиваться научные теплотехнические школы в старейшем техническом вузе страны — МВТУ им. Н.Э.Баумана.

Говоря о подвижниках отечественной науки, следует вспомнить о выдающемся ученом-инженере, профессоре Владимире Васильевиче Уварове (1899–1977 гг.), 100-летие со дня рождения которого отмечается в этом году. В 1924 г. Вл.В. Уваров защитил дипломную работу в МВТУ на тему “Паровые турбины мощностью 5000 кВт”. В протоколе государственной экзаменационной комиссии, куда входили известные ученые В.Е. Цыдзик, Н.Р. Брилинг, И.И. Куколевский и др., было отмечено: “Удостоен звания инженера-механика с отличием. Разработка проекта выдающаяся, защита блестящая”. Тогда же Вл.В. Уварова пригласили в МВТУ, где он работал до последних дней своей жизни. В 1927 г. Вл.В. Уваров провел исследования теплообмена в охлаждаемых соплах, а в 1930 г. в ВТИ под его руководством была организована лаборатория “Газовая группа”, в которой начались разработки высотного турбовинтового двигателя мощностью 1500 л. с. с температурой газа 1500 К. В 1936 г. начались испытания первого в мире высоко-температурного газотурбинного двигателя. Практически ко всем проектам энергоустановок, выполненным под руководством Вл.В. Уварова, применимо добавление “впервые в мире”. Это и проект самой мощной в мире стационарной многоагрегатной ГТУ, и создание на Коломенском заводе первого российского газотурбовоза, и разработка первой замкнутой газотурбинной установки для космической энергетики, и др. В 1935 г. Уваров выпустил первый учебник “Газовые турбины” [17]. В 1949 г. под его руководством в МВТУ создается кафедра газотурбостроения и впервые в мире организуется школа газотурбинистов, получившая в дальнейшем международное признание. Беззаветная преданность науке и целеустремленность при практической реализации своих идей совмещались у Вл.В. Уварова с большим гражданским мужеством. Когда, например, на общем собрании сотрудников ВТИ “осуждалась” деятельность репрессированного бывшего директора института профессора Л.К. Рамзина, Уваров задал вопрос о конкретных антигосударственных действиях арестованного и был единственным, кто воздержался от голосования.

Начинают проводиться регулярные всесоюзные и международные конференции по тепло- и массообмену, и российские ученые выходят на международную арену. В этой связи нельзя не отметить активную роль академика А.В. Лыкова, директора Института теплообмена Белорусской академии наук, который благодаря организации международных конференций по теплообмену в городе Минске, а также созданию Международного центра по теплообмену буквально “прорубил окно в Европу” для отечественных теплофизиков.

В одной статье невозможно даже перечислить основные научные достижения отечественных ученых в области тепло- и массообмена, поэтому в дальнейшем я остановлюсь только на тех работах, которые, с моей точки зрения, были пионерными и получили международное признание.

Создателем теории пограничного слоя, лежащей в основе теории конвективного теплообмена, является известный аэродинамик Л. Прандтль. До сих пор остается популярной его полуэмпирическая теория пристенной турбулентности (1904 г.) с известным логарифмическим распределением скоростей. Блестящее экспериментальное подтверждение теория Прандтля получила в классических работах И.И. Никурадзе (1894–1979 гг.). Иван Ильич Никурадзе родился в 1894 г. в гор. Самтредиа (Грузия), закончил гимназию в городе Кутаиси и поступил (вместе с братом) в Тбилисский университет. В 1919 г. он был зачислен в группу студентов, направленных для обучения в зарубежные страны. И. Никурадзе учился в Геттингенском университете и в 1923 г. успешно защитил докторскую диссертацию под руководством Прандтля “Наблюдения на распределение скорости в турбулентном течении”. В 1921 г. в Грузию пришла советская власть, однако И. Никурадзе, судя по материалам, которые стали доступны в последнее время, получил в консульстве советский паспорт и написал несколько писем ректору Тбилисского университета с просьбой принять его на работу. Вот отрывок из его

письма: “Я решил вернуться в Грузию в сентябре этого года (1927 г.) и приступить к работе в родном университете”. Но с 1926 г. начались гонения на ученых, работающих за рубежом, и мечте И. Никурадзе не суждено было сбыться. Такая же участь постигла и его брата Александра Никурадзе, ставшего известным специалистом в области физики твердого тела, этнографии и истории. Так наша страна потеряла двух выдающихся ученых, возможный вклад которых в отечественную науку трудно переоценить.

Большинство существующих инженерных методов расчета конвективного теплообмена основано на использовании интегрального уравнения энергии, которое впервые было записано Г.Н. Кружилиным и опубликовано в 1936 г. [18]:

$$\frac{d}{dx} \int_0^{\delta} \left(1 - \frac{v}{v_o}\right) \frac{w_x}{w_o} dy = \frac{a}{w_x v_o} \frac{dv}{dy} \Big|_{y=0}. \quad (4)$$

Интегральное уравнение Г.Н. Кружилина лежит в основе всех современных интегральных методов расчета теплового пограничного слоя. Следует отметить, что приоритет Кружилина в создании интегральных методов расчета признается в классических трудах основоположников теории теплообмена Гольдштейна [19], Эккерта [20], Григулля [21]. К сожалению, в последующих как зарубежных, так и отечественных публикациях ссылки на основополагающие работы Г.Н. Кружилина — одного из создателей теории теплового пограничного слоя — отсутствуют.

Рассматривая теорию конвективного теплообмена, следует напомнить о работах отечественных ученых, связанных с использованием известной аналогии Рейнольдса между процессами теплообмена и трения. В блестящей работе профессора А.А. Гухмана (1934 г. [22]), автора одной из первых отечественных монографий по теории теплообмена “Физические основы теплопередачи” [23], впервые показано, что связь между теплообменом и трением, вытекающая из аналогии Рейнольдса, не позволяет осуществить восстановление полного давления потока газа в охлаждаемом канале.

В 1936 г. профессор М.Ф. Широков [24] впервые показал, что известную аналогию Рейнольдса можно распространить и на течение сжимаемого газа, если коэффициент теплоотдачи определять по разности между равновесной температурой теплоизолированной стенки и температурой стенки.

Хорошо известна переменная Анатолия Александровича Дородницына (1942 г.), позволяющая преобразовать уравнение ламинарного пограничного слоя сжимаемого газа к классическим уравнениям несжимаемой жидкости [25].

Формула Петухова — Кириллова [26], основанная на использовании аналогии Рейнольдса, до сих пор является одной из наиболее популярных. Нельзя не отметить блестящие пионерные работы Якова Борисовича Зельдовича по обобщению опытных данных по теплообмену при естественной конвекции [27] и созданию тепловой теории горения (критерий Зельдовича — Шваба) [28, 29].

Мировое признание получили работы Алексея Васильевича Лыкова в области тепло- и массообмена в пористых средах [30]. Неудивительно, что самой престижной премией Международного центра по тепломассообмену является золотая медаль А.В. Лыкова.

Мировой известностью пользуются и работы Андрея Николаевича Колмогорова [31] по теории турбулентности, ставшие основой большинства современных дифференциальных методов расчета турбулентного пограничного слоя. Работа Г.С. Глушко (1965 г. [32]) была одной из первых, где использовались идеи Колмогорова для расчетов пристенной турбулентности.

Можно назвать много других наших ученых, которые внесли заметный вклад в теорию конвективного теплообмена и получили международное признание, однако ограниченные рамки статьи не позволяют это сделать.

Общепризнанным является вклад наших ученых в наиболее сложный раздел теории теплообмена — кипение жидкости. Одной из первых работ по кипению жидкости была известная монография Самсона Семеновича Кутателадзе [33] “Основы теории теплопередачи при изменении агрегатного состояния вещества”, опубликованная в 1939 г., когда автору было 25 лет. В монографии для обобщения опытных данных по теплообмену при фазовых переходах успешно использованы методы теории подобия и размерностей и в критериальные уравнения теплообмена введен критерий фазового перехода $K = r/(c_p \Delta T)$, получивший в дальнейшем название критерия Кутателадзе.

Необходимо отметить существенный вклад отечественных ученых в развитие теории подобия и методов анализа размерностей. Научной общественности хорошо известны работы Т.А. Афанасьевой-Эрнфест, М.В. Кирпичева, А.А. Гухмана, Л.С. Эйгенсона, Л.И. Седова, К.Д. Воскресенского, М.А. Михеева и других. Третья теорема подобия (Гухмана — Кирпичева) вошла в учебники по теории теплообмена. Безусловно, выдающимся является вклад Г.Н. Кружилина в создание теории теплообмена при кипении жидкости. По существу в работе “Обобщение экспериментальных данных по теплоотдаче при кипении жидкости в условиях свободной конвекции”, доложенной на семинаре в ЭНИНе в 1947 г. и опубликованной в 1948 г. [34], были сформулированы основные положения гидродинамического подхода к описанию процессов кипения, которые получили дальнейшее развитие в известных работах С.С. Кутателадзе [35]. Интересно отметить, что Г.Н. Кружилиным [36] на основе методов теории размерностей был предложен критерий, характеризующий оттеснение жидкости от перфорированной пластины, через которую продувается газ, и на основании обработки опытных данных получена величина этого критерия. Оставался один шаг до гидродинамической теории кризисов кипения, и этот шаг был сделан в 1950 г. С.С. Кутателадзе [35]. Проведя аналогию между барботажем газа в жидкость через перфорированный диск и кипением жидкости и заменив критический расход газа, соответствующий оттеснению жидкости от диска, соответствующим расходом пара, связанным с тепловой нагрузкой, С.С. Кутателадзе получил известную формулу для критической тепловой нагрузки:

$$\frac{q_{кр}}{r \sqrt{\rho''} \sqrt[4]{\sigma g (\rho' - \rho'')}} = K . \quad (5)$$

По опытным данным $K = 0.16$.

Можно привести немного примеров из теории теплообмена, когда исключительно простая и понятная модель могла дать такие эффективные результаты и послужить основой создания нового научного направления в наиболее сложной области теории теплообмена. Идея С.С. Кутателадзе о гидродинамической природе кризисов кипения получила дальнейшее развитие в известных работах И.И. Маленкова, Б.А. Авксентюка, В.Е. Дорощука, В.М. Боришанского, В.С. Полонского, С.А. Ковалева и многих других исследователей как у нас, так и за рубежом.

Благодаря статьям профессора Н. Зубера [37], который подвел математическую базу под гидродинамическую теорию кризисов кипения, имя Кутателадзе получило международное признание. В 1969 г. С.С. Кутателадзе за работы в области кипения, первым из отечественных ученых, был удостоен международной премии Макса Якоба, наиболее престижной международной премии в области тепломассообмена. Приоритет создания отечественными учеными гидродинамической теории кризисов кипения является общепризнанным достоянием отечественной науки, и тем более удивляет отсутствие ссылок на эти работы в последних зарубежных публикациях [38].

Международное признание в области теплообмена при кипении жидкости получили труды профессора Дмитрия Александровича Лабунцова. Несмотря на то что большинство работ Д.А. Лабунцова по кипению жидкости опубликовано более 25 лет назад, основные его взгляды на механизм теплообмена при кипении продолжают оставаться исключительно современными и находят новых последователей. Особенно актуальной стала модель Д.А. Лабунцова [39], основанная на рассмотрении процесса испарения микропенки под паровым пузырем, которая, по существу, лежит в основе современной теории теплообмена при кипении жидкости. Дальнейшее развитие идеи Д.А. Лабунцова получили в работах учеников его научной школы (В.В. Ягова, В.В. Клименко, Е.В. Аметистова, В.А. Григорьева, Ю.В. Козьмы-Китча и др.).

Общепризнанным (до последнего времени) считался приоритет отечественных ученых в изучении теплообмена к жидким металлам, а также к криогенным жидкостям (известные монографии В.М. Боришанского, С.С. Кутателадзе, И.И. Новикова, О.С. Федынского “Жидкометаллические теплоносители” [40] и В.А. Григорьева, Ю.М. Павлова, Е.В. Аметистова “Кипение криогенных жидкостей” [41]).

Международное признание имеют также работы отечественных ученых по гидродинамике и теплообмену при течении двухфазных потоков. Здесь прежде всего следует назвать пионерные работы профессора Александра Александровича Арманда (1894–1967 гг.) [42] по режимам течения, профессора Сергея Георгиевича Телетова [43] и др. Хорошо известны монографии С.С. Кутателадзе и М.А. Стыриковича “Гидравлика газожидкостных систем” [44], М.А. Стыриковича, О.И. Мартыновой, З.Л. Миропольского “Процессы генерации пара на электростанциях” [45], Б.С. Петухова, Л.Г. Генина, С.А. Ковалева “Теплообмен в ядерных энергетических установках” [46], М.А. Стыриковича, В.С. Полонского, Г.В. Циклаури “Тепломассообмен и гидродинамика в двухфазных потоках” [47]. Так называемые ухудшенные режимы теплообмена при течении жидкости в сверхкритической области впервые были описаны М.Е. Шицманом [48], и только позднее появились зарубежные публикации на эту тему.

В последнее время повышенный интерес проявляется к работам, в которых предлагается использовать методы неравновесной термодинамики для описания необратимых процессов тепло- и массообмена. В этой связи следует отметить, что основоположником термодинамики необратимых процессов является наш соотечественник, лауреат Нобелевской премии, иностранный член РАН Илья Пригожин. В 1957 г., на десять лет раньше аналогичных зарубежных публикаций, вышла в свет статья академика Ивана Ивановича Новикова [49], первого директора Института теплофизики СО АН СССР, в которой предлагалось учесть необратимые потери в теплообменниках в циклах энергетических установок. В результате была получена формула для экономичности такого цикла с максимальной мощностью:

$$\eta = 1 - \sqrt{\frac{T_2}{T_1}}, \quad (6)$$

известная в мировой литературе как формула Новикова.

Заслуженное признание получили пионерные работы наших соотечественников профессоров Г.Л. Поляка [50] и Ю.А. Суринова [51] в области радиационного теплообмена. Хорошо известны специалистам в области космической техники работы члена-корреспондента РАН Л.М. Бибермана, профессоров Л.А. Домбровского, Е.А. Суржикова, Н.А. Рубцова, которые достойно продолжили традиции наших классиков в области радиационного теплообмена. Простая и надежная формула Бибермана для учета совместного влияния радиации и конвекции получила широкое распространение в практике инженерных расчетов.

Большим международным авторитетом пользуется научная школа академика Белорусской академии наук Алексея Васильевича Лыкова. Хорошо известны классические работы А.В. Лыкова по сопряженным задачам нестационарной теплопроводности (критерий Лыкова) и процессам тепломассообмена в пористых средах. Идеи А.В. Лыкова получили достойное продолжение в работах его учеников академика БАН О.Г. Мартыненко (свободная и смешанная конвекция), профессора Л.Л. Васильева (процессы тепло- и массообмена в теплопередающих устройствах) и др.

Широкое международное признание получили достижения школы академика В.П. Скрипова и его учеников [52] в области фазовых переходов в метастабильных состояниях.

Менее известны мировой научной общественности работы по теплообмену при охлаждении ракетных двигателей (член-корреспондент АН СССР В.М. Иевлев и его ученики), охлаждению лопаток газовых турбин (О.И. Голубева, К.М. Попов, Б.А. Желтков (ЦИАМ), Вл.В. Уваров (МГТУ)), тепловой защите космических летательных аппаратов (А.С. Коротеев, Н.А. Анфимов, А.М. Губертов, Ю.В. Полежаева (НИИТП)). Существовавший долгие годы строгий режим секретности на работы по теплообмену практически не позволил опубликовать многие интересные научные результаты, полученные отечественными учеными, и закрепить их международный приоритет. С другой стороны, совершенно ясно, что создание таких новых областей техники, как ядерная энергетика, космическая техника, авиационная техника, биотехнология, а также различных отраслей военно-промышленного комплекса невозможно без организации широкого фронта научно-исследовательских работ, в том числе в области теплообмена. Почти все технические решения в перечисленных областях основаны на отечественных технологиях, научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработках.

В качестве примера можно привести опыт создания уникальной энергетической установки для подводной лодки с жидкометаллическим теплоносителем (свинец — висмут). Реакторы со свинцово-висмутовым теплоносителем не имели аналогов за рубежом. Вся методика теплотехнических расчетов подобных реакторов, в том числе и для известных космических аппаратов “Бук” и “Тополь”, базировалась на экспериментальных данных, полученных на уникальных стендах, созданных в Физико-энергетическом институте (ФЭИ) под руководством академика В.И. Субботина [53]. Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, выполненные со сплавом свинец — висмут В.И. Субботиным с сотрудниками, представляют интерес для будущей предельно безопасной ядерной энергетике [54]. Следует отметить, что на уникальной экспериментальной базе в ФЭИ были получены обширные данные по кризисам кипения воды, и результаты этих исследований, получившие международное признание (доклады профессора П.Л. Кириллова с сотрудниками на международных конференциях [55]), являются выдающимися достижениями отечественной науки.

Другой пример — создание ракетной техники, в том числе и для космических исследований. В работах талантливого российского ученого В.М. Иевлева [56] на базе современной теории пристенной турбулентности были созданы основы теплового расчета проточной части ракетных двигателей. Целый ряд новых идей был сформулирован В.М. Иевлевым значительно раньше, чем они появились в зарубежных публикациях (эффективность газовой завесы, определяющая температура, методы локального моделирования и т. д.).

Можно перечислить большее количество как организаций, так и ученых, работавших по спецтематике и получивших выдающиеся результаты в области теплообмена, но в пределах одной статьи это сделать невозможно. Всемирную известность имеют такие фирмы, как ЦАГИ, ЦИАМ, ЦКТИ, ВТИ, ИАЭ СО РАН и мн. др. Интенсивно расширяется область применения методов теории теплообмена в различных областях новой техники, причем в некоторых случаях, как, напри-

мер, охлаждение электронного оборудования, процессы теплообмена являются определяющими.

Указанные достижения в области теплообмена применительно к задачам новой техники были бы невозможны без подготовки квалифицированных научных кадров. В ведущих вузах страны были созданы кафедры теплофизического профиля, объединяющие коллективы специалистов-теплофизиков. На кафедре инженерной теплофизики Московского энергетического института под руководством члена-корреспондента АН СССР Б.С. Петухова была организована известная научная школа, получившая международное признание. На базе этой кафедры по инициативе академиков В.А. Кириллина и А.Е. Шейндлина создан академический Институт высоких температур, который в настоящее время является ведущим институтом Отделения физико-технических проблем энергетики РАН. Кафедра инженерной теплофизики Московского инженерно-физического института, возглавляемая академиком И.И. Новиковым, стала основой создания Института теплофизики СО АН СССР, получившего международное признание благодаря научным школам академиков С.С. Кутателадзе, В.Е. Накорякова, М.Ф. Жукова, членов-корреспондентов РАН Э.П. Волчкова, А.К. Реброва, профессоров Н.А. Рубцова, Е.М. Хабахпашевой, М.А. Гольдштика и др. При теплофизических кафедрах ведущих технических вузов (МГТУ им. Н.Э. Баумана, МЭИ, Московский, Харьковский и Казанский авиационные институты, Ленинградский политехнический институт и др.) были созданы проблемные лаборатории, где проводятся исследования процессов теплообмена в различных областях техники.

Заслуженным авторитетом пользовались отечественные учебники по теории теплопередачи, на которых училось не одно поколение теплофизиков. Всем известны монографии А.А. Гухмана [23], С.Н. Шорина [57], М.А. Михеева [58], И.И. Новикова и К.Д. Воскресенского [59], А.А. Померанцева [60], Б.С. Петухова [61], Б.Н. Юдаева [62], В.П. Исаченко, В.А. Осиповой, А.С. Сукомела [63], В.К. Кошкина [64], С.С. Кутателадзе [65], А.А. Жукаускаса [66], Е.В. Аметистова, В.В. Клименко, Ю.М. Павлова [67].

К концу XX столетия отечественная наука, как и вся страна, оказалась в глубоком кризисе. Закрываются научно-исследовательские институты, разрушаются научные школы, сокращается госбюджетное финансирование на фундаментальную науку, падает престиж профессии ученого, сокращаются конкурсы в ведущие вузы страны, нарушается преемственность поколений, увеличивается “утечка” молодой и талантливой молодежи за рубеж. Правительство и Президент России пытаются задержать процесс деградации отечественной науки, создавая программы “Интеграции вузовской и академической науки”, “Поддержки ведущих научных школ”, Российский фонд фундаментальных исследований и другие фонды. Однако совершенно очевидно, что все эти меры будут неэффективны, пока не заработает отечественная промышленность. Хотелось бы напомнить еще раз, что все выдающиеся достижения отечественных ученых в области теории теплообмена, о которых говорилось выше, были связаны с запросами интенсивно развивающихся областей передовой техники: энергетики, авиации, космоса и военно-промышленного комплекса.

Отечественные ученые-теплофизики в уходящем столетии достойно поддержали престиж отечественной науки в наиболее сложных областях теории теплообмена. Остаются надежды на следующее поколение ученых, которое в XXI веке должно продолжить славные традиции своих предшественников.

Описанию истории теплотехнической науки посвящено несколько блестящих монографий видных ученых и историков. Большой фактический материал при написании этой статьи был взят из монографий В.А. Кириллина [68], С.С. Кутателадзе и Р.В. Цукермана [20], В.С. Виринского [3] и др. Кроме того, автору статьи удалось получить интересную информацию от классиков нашей отечественной науки — академика И.И. Новикова, члена-корреспондента РАН Г.Н. Кружилина и

профессора Ю.А. Суринова, за что автор выражает им искреннюю признательность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ломоносов М.В. Размышления о причине теплоты и холода // Новые комментарии Петербургской академии наук. Т. 1, 1747.
2. Остроградский М.В. Об уравнении распространения тепла в жидкости // Mem. Acad. — 1836. — Vol. 1, No. 4. — С. 25–26.
3. Вишинский В.С. Иван Иванович Ползунов. — М.: Наука, 1989. — 175 с.
4. Божерянов Н.Н. Описание изобретения и постепенного усовершенствования паровых машин. — СПб., 1842. — 169 с.
5. Альмов И.П. О тяги печи парового котла. Сб. № 9. — М., 1864.
6. Вышнеградский И.А. Механическая теория теплоты. Литогр. изд. — СПб., 1870–1871.
7. Петров Н.П. Курс паровых котлов. — СПб., 1876.
8. Предтеченский А.И. Курс паровых котлов. — Харьков, 1900.
9. Погодин А. Паровые котлы. — СПб, 1901.
10. Гавриленко А.П. Паровые котлы. — М., 1900.
11. Кириш К.В. Котельные установки. — М., 1915.
12. Гриневицкий В.И. Графический расчет парового котла. — М., 1905.
13. Кутателадзе С.С., Цукерман Р.В. Работы русских ученых в области котельной техники. — М.; Л.: Госэнергоиздат, 1951. — 226 с.
14. Умов Н.А. Уравнение движения энергии в телах. — Одесса, 1874.
15. Кирпичев М.В. Новые идеи в области паровых котлов // Новые идеи в технике. — Петроград, 1916.
16. Кирпичев М.В., Михеев М.А. Моделирование тепловых устройств. — М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1936. — 320 с.
17. Уваров Вл.В. Газовые турбины. — М.; Л.: ОНТИ, 1935. — 212 с.
18. Кружилин Г.Н. Исследование теплового пограничного слоя // ЖТФ. — 1936. — Т. 6, № 3. — С. 561–572.
19. Modern developments in fluid dynamics / Ed. S. Goldstein. — Oxford, 1936.
20. Eckert E.R., Drake R.M. Heat and Mass Transfer. — McGraw-Hill Book Company, 1959.
21. Grigull U. Die Grundgesetze der Warmenbertragung. — Berlin: Springer-Verlag, 1955.
22. Гухман А.А. К теории предельных состояний движущегося газа // ЖТФ. — 1939. — Т. 9, № 5. — С. 411–423.
23. Гухман А.А. Физические основы теплопередачи. — Л.; М.: ОНТИ — Госэнергоиздат, 1934. — 315 с.
24. Широков М.Ф. Теория теплообмена и гидравлического сопротивления при больших скоростях потока // ЖТФ. — 1937. — Т. 7, № 3. — С. 267–281.
25. Дородницын А.А. Пограничный слой в сжимаемом газе // Прикладная матем. и мех. — 1942. — Т. 6, № 6. — С. 449–486.
26. Петухов Б.С., Детлаф А.А., Кириллов В.В. Экспериментальное исследование местной теплоотдачи пластины в дозвуковом турбулентном потоке воздуха // ЖТФ. — 1954. — Т. 24, № 10. — С. 1761–1772.
27. Зельдович Я.Б. Предельные законы свободно-восходящих конвективных потоков // Журн. эксп. и теор. физ. — 1937. — Т. 7, № 12. — С. 1463–1465.
28. Шваб В.А. Связь между температурами и скоростными полями газового факела // Исследование процессов горения натурального топлива. — М.; Л.: Госэнергоиздат, 1948. — С. 231–248.
29. Зельдович Я.Б. К теории горения неперемешанных газов // ЖТФ. — 1949. — Т. 19, № 10. — С. 1199–1210.
30. Лыков А.В. Теория теплопроводности. — М.: Высшая школа, 1967. — 600 с.
31. Колмогоров А.Н. Уравнения турбулентного движения несжимаемой жидкости // Изв. АН СССР. Сер. физ. — 1942. — Т. 6, № 1-2.
32. Глушко Г.С. Турбулентный пограничный слой на плоской пластине в несжимаемой жидкости // Изв. АН СССР. Сер. механика. — 1965. — № 4. — С. 13–23.
33. Кутателадзе С.С. Основы теории теплоотдачи при изменении агрегатного состояния вещества. — Л.: Машгиз, 1939. — 136 с.

34. Кружилин Г.Н. Обобщение экспериментальных данных по теплоотдаче при кипении жидкостей в условиях свободной конвекции // Изв. АН СССР. Отд. техн. наук. — 1949. — № 5. — С. 701 – 712.
35. Кутателадзе С.С. Гидромеханическая модель кризиса теплообмена в кипящей жидкости при свободной конвекции // ЖТФ. — 1950. — Т. 20, № 11. — С. 1389 – 1392.
36. Кружилин Г.Н. Теплоотдача от поверхности нагрева к кипящей однокомпонентной жидкости при свободной конвекции // Изв. АН СССР. Отд. техн. наук. — 1948. — № 7. — С. 967 – 980.
37. Zuber N. On the stability of boiling heat transfer // Trans. ASME. — 1958. — Vol. 80, No. 3. — P. 711 – 720.
38. International Encyclopedia of heat-mass transfer / Eds. G.F. Hewitt, G.L. Shires, Y.V. Polezhaev, 1998.
39. Лабунцов Д.А. Обобщенные зависимости для теплоотдачи при пузырьковом кипении жидкости // Теплоэнергетика. — 1960. — № 5. — С. 76 – 81.
40. Боришанский В.М., Кутателадзе С.С., Новиков И.И., Федьинский О.С. Жидкометаллические теплоносители. — М.: Атомиздат, 1967. — 300 с.
41. Григорьев В.А., Павлов Ю.М., Аметистов Е.В. Кипение криогенных жидкостей. — М.: Энергия, 1977. — 290 с.
42. Арманд А.А. Сопротивление в двухфазных системах в горизонтальных трубах // Изв. ВТИ. — 1946. — № 1. — С. 16.
43. Телетов С.Г. Вопросы гидродинамики двухфазных смесей. 1. Уравнения гидродинамики и энергии // Вестник МГУ. Сер. матем., мех., астрон., физ., хим. — 1958. — № 2. — С. 15 – 28.
44. Стырикович М.А., Кутателадзе С.С. Гидравлика газожидкостных систем. — М.; Л.: Госэнергоиздат, 1958. — 232 с.
45. Стырикович М.А., Мартынова О.И., Миропольский З.Л. Процессы генерации пара на электростанциях. — М.: Энергия, 1969. — 312 с.
46. Петухов Б.С., Генин Л.Г., Ковалев С.А. Теплообмен в ядерных энергетических установках. — М.: Атомиздат, 1974. — 408 с.
47. Стырикович М.А., Полонский В.С., Циклаури Г.В. Тепломассообмен и гидродинамика в двухфазных потоках атомных электростанций. — М.: Наука, 1982. — 368 с.
48. Шицман М.Е. Ухудшенные режимы теплоотдачи при закритических давлениях // Теплофизика высоких температур. — 1963. — Т. 1, № 2. — С. 267 – 275.
49. Новиков И.И. Эффективность атомных станций // Атомная энергия. Т. 3. — М., 1957. — С. 409 – 412.
50. Поляк Г.Л. Лучистый теплообмен тел с произвольными индикаторами отражения поверхностей // Конвективный и лучистый теплообмен. — М.: Изд. ЭНИН АН СССР, 1960. — 123 с.
51. Суринов Ю.А. Об основных методах современной теории лучистого теплообмена // Проблемы энергетики. — М.: Изд. ЭНИН АН СССР. — 1959. — С. 423 – 469.
52. Скрипов В.П. Метастабильная жидкость. — М.: Наука, 1972. — 312 с.
53. Субботин В.И., Ибрагимов М.Х., Ушаков П.А. и др. Гидродинамика и теплообмен в атомных энергетических установках. — М.: Атомиздат, 1975. — 408 с.
54. Субботин В.И. Двадцать первый век — век ядерной энергетики // Физика элемент. частиц и атомн. ядра. — 1998. — Т. 29, № 2. — С. 333 – 388.
55. Kirillov P.L. Some aspects of heat transfer during nuclear reactor accidents // Proc. of the Tenth Intern. Heat Transfer Conf. — Brighton, UK, 1994. — 387 p.
56. Иевлев В.М. Турбулентное движение высокотемпературных сплошных сред. — М.: Наука, 1975. — 346 с.
57. Шорин С.Н. Теплопередача. — М.: Госстройиздат, 1952. — 339 с.
58. Михеев М.А. Основы теплопередачи. — М.: Л.: Гос. энергет. изд-во, 1956. — 392 с.
59. Новиков И.И., Воскресенский К.Д. Прикладная термодинамика и теплопередача. — М.: Госатомиздат, 1961. — 548 с.
60. Померанцев А.А. Курс лекций по теории тепломассообмена. — М.: Высшая школа, 1965. — 350 с.
61. Юдаев Б.Н. Теплопередача. — М.: Высшая школа, 1973. — 319 с.
62. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. — М.: Энергия, 1975. — 488 с.
63. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике / Под ред. В.К. Кошкина. — М.: Машиностроение, 1975. — 624 с.
64. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. — М.: Атомиздат, 1979. — 415 с.
65. Жукаускас А.А. Конвективный перенос в теплообменниках. — М.: Наука, 1982. — 472 с.
66. Аметистов Е.В., Клименко В.В., Павлов Ю.М. Кипение криогенных жидкостей. — М.: Энергоатомиздат, 1995. — 400 с.
67. Петухов Б.С. Теплообмен и сопротивление при ламинарном течении жидкости в трубах. — М.: Энергия, 1967. — 412 с.

68. Кириллин В.А. Страницы истории науки и техники. — М.: Наука, 1986. — 512 с.

Статья поступила в редакцию 15 апреля 1999 г.