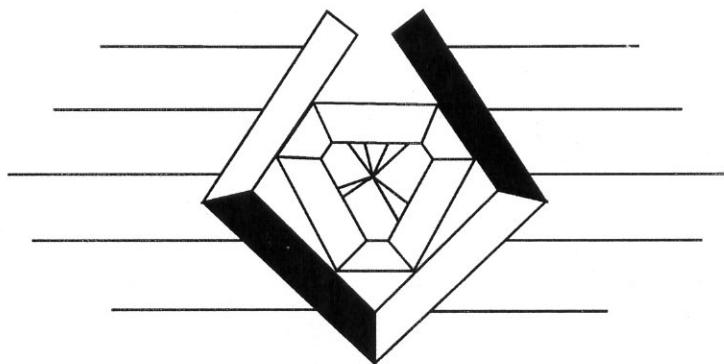


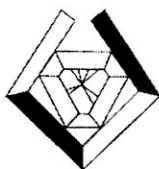
Выдающиеся ученые



университета ИТМО

ВЫДАЮЩИЕСЯ УЧЕНЫЕ УНИВЕРСИТЕТА ИТМО

*Серия монографий ученых Санкт-Петербургского государственного
университета информационных технологий, механики и оптики
(бывшего Ленинградского института точной механики и оптики)*



Выпуск 9

Основана в 2000 году по решению
Ученого Совета университета
в ознаменование 100-летия со дня создания
в составе Ремесленного училища цесаревича Николая
Оптико-механического и часового отделения,
превращенного трудами нескольких
поколений профессоров и преподавателей
в один из ведущих
университетов России

Редакционная коллегия серии:
проф. В.Н. Васильев (председатель), проф. Г.Н. Дульнев,
проф. Ю.Л. Колесников, проф. С.П. Митрофанов, проф. Г.И. Новиков,
проф. М.И. Потеев (ученый секретарь)
Главный редактор – заслуженный деятель науки и техники РСФСР,
академик Академии естественных наук Российской Федерации,
профессор Г.Н. Дульнев

Г.М. Кондратьев

Г.Н. Дульнев

Е.С. Платунов

Н.А. Ярышев

ПРИКЛАДНАЯ ФИЗИКА

Теплообмен

в приборостроении

Рекомендовано Учебно-методическим объединением вузов России по университетскому политехническому образованию в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки бакалавров 553100 – «Техническая физика», дисциплине «Прикладная физика»

УДК 536.24:681.2

Кондратьев Г.М., Дульнев Г.Н., Платунов Е.С., Ярышев Н.А.

Прикладная физика: Теплообмен в приборостроении. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2003. – 560 с.

Содержатся основные результаты исследований научной школы профессора Г.М. Кондратьева. Рассматривается физика теплового регулярного режима. Излагаются приближенные методы анализа задач теплопроводности; термостатирования приборов, измерение температур и тепловых потоков. Исследуются тепловые режимы радиоэлектронных, электронных, оптико-электронных и оптических приборов. Анализируются тепломассообмен процессов в материалах с фазовыми превращениями. Описываются результаты исследований сотрудников кафедры компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга СПбГУ ИТМО в других областях науки.

The issue contains basic outcomes of scientific researches of professor Kondrat'ev's scientific school. The physics of a thermal regular condition is considered. The approximated methods of the analysis of problems of a thermal conduction, thermostating of gears, measuring of temperatures and thermal streams are stated. The thermal conditions of radiotronics, electronics and optics are investigated. Mass and heat interchange in processes and materials with phase changes is analyzed. The outcomes of RD works of the employees of faculty of a computer thermal physics and energy and physics monitoring in other fields of science are stated.

Для инженеров, научных сотрудников, аспирантов и студентов соответствующих специальностей.

ISBN 5-7577-0172-2

© Санкт-Петербургский
государственный университет
информационных технологий,
механики и оптики, 2003
© Издательство ИВА, 2003

Ушедшим в мир иной и ныне здравствующим коллегам по теплофизической школе СПбГУ ИТМО с любовью посвящаем эту книгу.

Г. Дульнев, Е. Платунов, Н. Ярышев

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящая книга содержит краткий обзор научных работ, выполнявшихся сотрудниками коллектива кафедры теплофизики ЛИТМО с 1937 по 1992 год. Основал кафедру и до 1958 года руководил ею Георгий Михайлович Кондратьев – выдающийся ученый в области теории теплообмена и теплофизических измерений, работы которого еще в довоенные годы получили широкую известность в стране и за рубежом. В 1957 году при кафедре постановлением Совмина СССР была организована одна из первых в стране проблемных научных лабораторий, которая успешно функционировала до распада Советского Союза.

В послевоенные годы Георгий Михайлович сплотил вокруг себя небольшой коллектив аспирантов и сотрудников, покорив их своей эрудицией, душевной щедростью и привил любовь к своей науке. Оставшись без учителя, эта группа сплотилась вокруг своего старшего коллеги Г.Н. Дульнева и продолжила начатые при Георгии Михайловиче исследования в стенах проблемной лаборатории. С годами проблемная лаборатория стала центром подготовки инженеров и научных кадров высшей квалификации, установила обширные творческие связи с передовыми теплофизическими центрами и активно откликалась на запросы отраслевых организаций и предприятий. В итоге к концу восьмидесятых годов ушедшего столетия из фундаментальных работ Г.М. Кондратьева выросло самостоятельное научное направление. У некоторых его учеников сформировались свои научные школы.

Идея написать книгу, органично обобщающую исходные работы Г.М. Кондратьева и исследования его учеников была выдвинута Г.Н. Дульневым. Соавторами этой книги являются представители научной школы кафедры компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга (КТФиЭМ) Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики СПбГУ ИТМО доктора технических наук Г.Н. Дульнев, Е.С. Платунов, Н.А. Ярышев. Четвертым соавтором этой книги является создатель школы, покойный профессор Георгий Михайлович Кондратьев – заслуженный деятель науки и техники РСФСР, доктор технических наук.

Общее мнение ныне здравствующих соавторов было единодушно – поставить первым в списке имя Г.М. Кондратьева. Это вызвано не только тем, что он являлся основоположником школы, но и фактом изложения в книге в сокращенном виде значительного числа ранее опубликованных трудов этого ученого. Главными научными трудами Г.М. Кондратьева являются монография “Регулярный тепловой режим” и учебник “Тепловые измерения” [1, 2], материалы которых в современном изложении нашли отражение в предлагаемой книге. Теория регулярного теплового режима – одно из крупнейших достижений советской науки – получила широкое применение в научно-прикладных исследованиях и привела к созданию новой техники тепловых измерений и методов тепловых расчетов. По своему содержанию упомянутые выше книги являются в мировой литературе оригинальными.

После смерти Г.М. Кондратьева в 1958 году созданную им кафедру и проблемную лабораторию возглавил его ученик, доктор технических наук, профессор Г.Н. Дульнев, ставший впоследствии заслуженным деятелем науки и техники РСФСР, действительным членом РАЕН. Он продолжил сформулированное Г.М. Кондратьевым научное направление кафедры и проблемной лаборатории “Применение учения о теплообмене в приборостроении и других задачах науки и техники”. Под руководством Г.Н. Дульнева интенсивно развивались проблемная лаборатория и кафедра, росло число аспирантов и докторантов, расширялись связи с другими творческими коллективами в стране, то есть крепла научная школа. Наряду с развитием указанной выше тематики возникли новые, и порой, неожиданные научные направления, не связанные непосредственно с приборостроением.

В книге преимущественно рассматриваются математические модели процессов теплообмена в разнообразных технических объектах. Заметим, что математическое моделирование – это лишь начальный этап в создании прибора, но инженерное решение задачи им не ограничивается. Выбранные и теоретически обоснованные расчетные модели необходимо реализовать, то есть осуществить проектные, конструкторские, технологические и испытательные работы. Но первый этап процесса создания прибора – математическое описание основного явления в объекте – весьма важен и труден, он имеет самостоятельное значение и заслуживает специального рассмотрения.

В двух первых разделах книги представлены теоретические основы приближенных методов описания явлений теплообмена. Заметим, что в двадцатом веке к приближенным методам часто прибегали в математике, физике, в инженерных науках. Увлечение чистой математикой обычно вызывает вопрос: зачем математическая точность уходит дальше, чем достаточно для жизни? Профессор Санкт-Петербургского государственного универ-

ситета Р.Г. Баранцев, размышляя о путях развития математики, пишет: "... от математических методов потребовалось, при сохранении достаточной точности, умение не разрушать целостности изучаемого объекта". Эту задачу выполняли асимптотические (приближенные) методы, которые "... сто лет терпеливо, как Золушка, трудились на кухне классической математики, униженные комплексом неполноценности... Греческий термин *asymptotos* означает *несовпадающий*, подчеркивая тем самым, что асимптотическое приближение не превращается в совпадение... Отдавая асимптотическим методам должное как искусству, в настоящую науку их все-таки не пускали: не позволяла неустранимая неточность. И вот в конце двадцатого века этот гадкий утенок вырастает в лебедя новой парадигмы... сейчас в этих методах есть и контролируемая оценка точности" [3].

В первом разделе книги рассматривается одно из направлений приближенного анализа – теория регулярного теплового режима, а во втором – другие приближенные методы аналитической теории теплопроводности.

Третий раздел книги посвящен математическим моделям и разработанным на их основе методам и приборам для измерения теплофизических свойств веществ. Здесь, наряду с известными методами регулярного режима, приведены новые методические и приборные решения, основанные на нелинейном представлении математической модели теплопроводности.

В четвертом разделе дано обоснование теоретических основ проектирования устройств для термостатирования, а также регистрации нестационарных температур и тепловых потоков. Сотрудники кафедры уделяли много внимания этим практически важным задачам и предложили ряд оригинальных решений.

Пятый раздел содержит анализ тепловых режимов различных объектов приборостроения. Наиболее полно рассмотрены тепловые и математические модели электронных аппаратов, радиоэлектронных устройств, оптических и оптико-электронных приборов. В середине XX века в ряде стран были развернуты исследования по обеспечению теплового режима этих объектов. В последнее время основное внимание в этой области обращено на создание автоматизированных систем управления температурными полями объектов и разработке миниатюрных систем охлаждения. Все это вызвало к жизни новые задачи, связанные с автоматизацией систем проектирования приборов.

В шестом разделе изучаются явления, связанные с изменениями фазового состояния вещества, их математическое описание и решение некоторых методических проблем. Рассмотрены вопросы тепловой защиты аэрокосмических аппаратов, технологии обработки материалов с исполь-

зованием лазеров, вытяжки оптического волокна, производства лазерных дисков. Все эти, столь разнообразные по своему содержанию проблемы, базируются на единых методических подходах.

В завершающем седьмом разделе книги, как уже отмечалось, излагаются тепловые проблемы непосредственно не связанные с приборостроением, им сотрудники кафедры в разное время уделяли серьезное внимание.

Более чем полувековая деятельность кафедры и проблемной лаборатории, результаты работы этих коллективов, общение с выпускниками кафедры, сотрудниками, дипломантами, аспирантами и докторантами позволяет сделать ряд любопытных выводов.

1. Кафедра КТФ и ЭМ была организована в ЛИТМО в 1937 году и долгие годы носила название кафедры теплофизики, она действует и по настоящее время. Проблемная лаборатория при кафедре была создана по постановлению Совмина СССР в 1957 году и просуществовала 35 лет, до 1992 года, то есть до распада Советского Союза. Наиболее плодотворный период деятельности научного коллектива приходится именно на эту треть века. За все годы кафедра выпустила свыше 1000 инженеров-теплофизиков, более 80 кандидатов наук, 18 докторов наук. Многие из них продолжают заниматься научно-педагогической деятельностью, часть выходцев кафедры занимали и занимают высокие административные или политические посты, кто-то ушел в мир иной. Любопытно проследить судьбу отдельных выпускников кафедры и коллектива в целом.

Скромный аспирант кафедры, приехавший из Киргизии, А.А. Акаев поразил нас ярко выраженной математической и общей культурой, впоследствии он стал Президентом Академии наук республики, а затем – Президентом Кыргызстана. Во втором разделе изложены основные положения его кандидатской диссертации.

Руководитель проблемной лаборатории и кафедры теплофизики (с 1958 по 1995 год) Г.Н. Дульнев уже в 30 лет защищает докторскую диссертацию, а впоследствии становится ректором ЛИТМО (с 1974 по 1986 год), Заслуженным деятелем науки и техники РСФСР, академиком РАЕН.

Другой сотрудник проблемной лаборатории В.Н. Васильев – выходец из Ставропольского края, после защиты докторской диссертации организует в ЛИТМО новую кафедру компьютерных технологий, далекую от проблем теплофизики. С 1997 года по настоящее время он – ректор СПбГУ ИТМО, заслуженный деятель науки Российской Федерации и успешно развивает в университете научные исследования в новой для него области науки, активно занимается подготовкой научных и инженерных кадров.

Один из соавторов книги заслуженный деятель науки Российской Федерации, профессор Е.С. Платунов защитил на кафедре докторскую диссертацию и в дальнейшем возглавил кафедру физики Санкт-Петербургского государственного университета низкотемпературных и пищевых технологий, издал ряд книг по методам определения теплофизических свойств веществ и учебные пособия по всему курсу физики.

Аналогична судьба и другого соавтора – заслуженного работника высшей школы, доктора технических наук, профессора Н.А. Ярышева. Он также долгое время возглавлял кафедру физики ИТМО, был проректором и деканом инженерно-физического и естественно-научного факультетов университета, стал известным специалистом в области термометрии и нестационарной теплопроводности; им издано несколько книг и справочных пособий.

Ученик Г.М. Кондратьева – профессор А.И. Лазарев – прошел Великую Отечественную войну, окончил ЛИТМО и аспирантуру по теплофизике, затем перешел работать в Государственный оптический институт; защитил докторскую диссертацию на стыке наук теплофизики, оптики, космонавтики; долгое время возглавлял там отдел по прикладным космическим исследованиям; написал 6 книг и закончил свой жизненный путь в 2002 году.

Выпускник кафедры доктор технических наук, профессор Б.Н. Олейник, участник и инвалид Великой Отечественной войны закончил аспирантуру у Г.М. Кондратьева, после защиты диссертации в течение многих лет до своей кончины в 1995 году занимал во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева ряд ответственных постов (начальник лаборатории, отдела, заместитель директора института). Б.Н. Олейник сформировал новое направление работ по эталонной тепловой калориметрии. Под его руководством подготовлена большая группа научных сотрудников-метрологов.

Сотрудник Г.М. Кондратьева по ВНИИМ доктор технических наук И.И. Киренков (1914-1979) возглавлял отдел температурных измерений, руководил созданием эталонного газового термометра.

Другой сотрудник Г.М. Кондратьева по ВНИИМ – доктор технических наук, профессор А.Н. Гордов в течение ряда лет работал профессором ЛИТМО, являлся крупным специалистом по термометрии, автором многих монографий. Под его руководством был подготовлен значительный коллектив специалистов высшей квалификации. В их числе доктора наук, профессора Б.И. Стадник, В.И. Лах, создавшие в дальнейшем свою научную школу во Львовском техническом университете.

Ученик Г.М. Кондратьева доктор технических наук, профессор О.А. Сергеев со студенческих лет занимался научной работой на кафедре, а по-

зднее в области метрологии тепловых процессов, возглавлял научную лабораторию сначала во ВНИИМ, а затем в московских учреждениях, написал несколько монографий по проблемам метрологии и передачи теплоты в лучепрозрачных средах.

Выпускник кафедры А.Ф. Залетнев много лет являлся заведующим проблемной лабораторией, в 1994 году защитил докторскую диссертацию по проблемам теплообмена и в настоящее время успешно продолжает работу в НИИ жиров Российской академии сельскохозяйственных наук, возглавляет сектор теплообмена.

Из стен кафедры вышел и нынешний ее заведующий, доктор технических наук, профессор А.В. Шарков, специалист в области тепловых режимов и термостатирования приборов. В трудных условиях нашего времени он предпринимает большие усилия, чтобы сохранить педагогический коллектив кафедры.

Многие сотрудники и аспиранты кафедры после защиты докторских диссертаций возглавляют кафедры физики, математики в разных вузах бывшего СССР и за рубежом, отделы в НИИ, работали профессорами (это доктора наук Г.Н. Лукьянов, В.В. Новиков, Р.А. Мустафаев, А.Е. Мехрабов, С.Е. Буравой, В.В. Курепин, В.Г. Парфенов, Ю.П. Заричняк, В.П. Козлов, Цинь Юнле, С.М. Горохов), каждый из них является автором одной-двух монографий.

Длительное время работали на кафедре и внесли существенный научный вклад в ее развитие сотрудники Л.Б. Андреева, В.П. Бабин, А.Ф. Бегункова, В.Ф. Беляева, А.П. Беляков, Э.Ф. Буц, Ю.Н. Глебов, Ю.А. Гаврилов, Ю.Л. Гурьев, Н.М. Дульнева, В.И. Егорова, А.И. Егоров, Р.А. Испирян, А.И. Кайданов, Л.А. Комкова, К.С. Кузьмин, А.М. Миндлин, Б.Л. Муратова, М.Ю. Спокойный, Э.М. Семяшкин, А.В. Сигалов, Н.Н. Тарновский, С.В. Тихонов, С.Э. Хоружников, И.Ф. Шубин, В.Н. Черкасов, К.Г. Черкасова. Этот список можно было бы значительно продолжить.

2. В рассматриваемый период работы кафедры с 1957 по 1992 год ее сотрудники большое внимание уделяли научно-общественной деятельности. Профессор Г.Н. Дульнев руководил секцией теплофизических свойств веществ Научного совета по теплообмену при Госкомитете по науке и технике, возглавляемым академиком А.В. Лыковым. Творческое общение происходило на конференциях, выездных заседаниях секции, в различных научных учреждениях, разбросанных по всей территории СССР. Так осуществлялось знакомство с наиболее интересными научными разработками разных ученых, новыми идеями, так создавался невидимый научный колледж в данной области знаний. Кафедра с 1969 года явилась инициатором создания общесоюзной теплофизической школы, приобретшей впоследствии статус международной.

Тесные творческие контакты установились с профессором Харьковско-го авиационного технического университета, доктором технических наук Д.Ф. Симбирским, с профессорами Новочеркасского технического университета докторами наук В.Е. Шукшуновым и Е.И. Фандеевым. Много лет продолжалось сотрудничество с Институтом технической теплофизики АН Украины и его сотрудниками членом-корреспондентом АН УССР доктором технических наук О.А. Герашенко, доктором технических наук Т.Г. Грищенко, профессором Л.А. Коздобой, кандидатом технических наук Г.Я. Шимчук. Отмеченные здесь контакты приводили к изданию совместных монографий и выполнению крупных научных работ.

По фундаментальным проблемам теплофизики шло сотрудничество со многими московскими учеными: академиками В.Н. Кириллиным, И.И. Новиковым, А.Е. Шейндлиным, профессорами М.П. Вукаловичем, В.В. Яговым, К.А. Якимовичем, членом-корреспондентом РАН Э.Э. Шпильрайном, Н.Б. Варгафтиком, Л.П. Филипповым, Д.Л. Тимротдом.

Тесные контакты поддерживались с белорусскими учеными: академиками А.В.Лыковым, О.Г. Мартыненко, А.Г. Шашковым. В течение длительного времени проводилось сотрудничество и совместные работы с доктором технических наук, профессором Я.В. Малковым и его коллективом (НИИ измерительной техники, город Королев).

Сотрудники кафедры постоянно поддерживали творческие контакты по обеспечению тепловых режимов при конструировании радиоэлектронных устройств с научно-исследовательским центром “Шторм” и преподавателями технического университета в городе Одесса (профессор Ю.Е. Спокойный, Л.Л. Роткоп, Л.П. Грабой, А.Б. Гидалевич).

Тесное содружество осуществлялось с сотрудниками Тамбовского института химического машиностроения профессорами В.В. Власовым, С.В. Мищенко и профессором Санкт-Петербургского государственного технического университета профессором К.М. Арефьевым.

К сожалению, после 1992 года эта деятельность значительно сузилась, связи прервались, ученые заняты выживанием.

3. Остановимся еще на одном интересном наблюдении. Через кафедру прошли сотни людей разных национальностей (русские, украинцы, белорусы, киргизы, грузины, армяне, азербайджанцы, евреи, китайцы, поляки, болгары, якуты, таджики и другие). Примерно 85% составляли русские сотрудники. Мы не заметили какой-либо корреляции между способностью человека к научно-преподавательской деятельности и национальностью. Этот вывод стар как мир, еще Христос говорил, что “несть эллина, несть иудея”, и об этом не стоило бы говорить, если бы не средства массовой информации. Из них мы узнаем нелепые качества русских людей, они де лентяи, пьяницы, не умеют работать.

4. Опыт работы проблемных лабораторий в СПбГУ ИТМО на кафедрах КТ и ЭМ, “Квантовая электроника и биомедицинская оптика” и “Оптические приборы” показал, что они являлись в советское время весьма эффективной формой организации науки в условиях высшего учебного заведения. Обычно проблемные лаборатории создавались по постановлению Совета Министров СССР и ходатайству вуза на тех кафедрах, которыми руководили крупные ученые, имеющие солидный научный задел в какой-либо области науки. Штатный состав проблемной лаборатории состоял из инженеров, лаборантов, механиков и небольшого числа научных сотрудников. В ЛИТМО численный состав проблемной лаборатории на кафедре теплофизики составлял в разное время от 5 до 20 человек, но она объединяла вокруг себя преподавателей, докторантов, аспирантов, дипломантов, студенческий кружок. Сотрудники лаборатории и кафедры, как правило, участвовали в хоздоговорных НИР, что позволяло работать на 1,2-1,5 ставки, но отчеты по госбюджетным и хоздоговорным работам были разные, тематики их не совпадали, за этим строго следили.

Такая организация исследований позволяла:

- получить значимые научные результаты при весьма скромных затратах;
- оперативно реагировать на новые запросы в науке и технике, быстро перестраивать планы работ, в отличие от обычных научных институтов с громоздкой организацией труда;
- успешно подготавливать научные кадры разной степени квалификации;
- повышать квалификацию преподавателей кафедры, так как они постоянно находились в атмосфере поиска, научных новинок, запросов молодых коллег.

Новый социальный строй и его руководители сломали эту форму организации вузовской науки, как, впрочем, и научную деятельность.

Наступили девяностые годы, в России бушевала перестройка, шло всеобщее разрушение – государственных структур, промышленности, сельского хозяйства, науки, образования, нравственности и так далее – была разрушена и проблемная лаборатория, еле-еле устояла кафедра.

Когда мы готовили эту рукопись, то перелистали большое количество статей и книг наших коллег, вспомнили прежние острые споры и непростые жизненные коллизии. И вновь были поражены талантом сотрудников, бескорыстием и высокими стремлениями их душ.

В книге мы не пытались отразить этот внутренний мир взаимоотношений, который существовал между сотрудниками кафедры, преподавателями, аспирантами и студентами, да и вряд ли это было бы с нашей сторо-

ны объективно изложено. Поэтому сошлемся лишь на одобрительные устные и письменные оценки выпускников кафедры о нашем желании написать такую книгу и приведем выдержки из письма одной из выпускниц кафедры С.У. Манжиковой.

Дорогие мои учителя Геннадий Николаевич, Николай Алексеевич, Евгений Степанович!

С низким поклоном к Вам Светлана Манжикова.

Прекрасная идея – написать книгу о нашей кафедре периода нашей аспирантуры и студенчества на старших курсах. Сейчас, имея уже достаточный жизненный опыт, опыт работы как в качестве преподавателя, так и в качестве исследователя-исполнителя научных работ, могу с уверенностью говорить, что кафедра теплофизики ЛИТМО 1958-1992 годов была эталоном вузовского научно-педагогического подразделения, работавшего с энтузиазмом в условиях хорошего материально-технического обеспечения, которое было основано на инициативе собственно руководителей и сотрудников кафедры. Познакомившись с организацией процесса обучения и работы профессоров и преподавателей Университета Вашингтона в Сиэтле, США, могу с уверенностью сказать, что уровень менеджмента и маркетинга на кафедре теплофизики в ЛИТМО в те годы был ни сколько не ниже, чем современный менеджмент и маркетинг в этом, одном из крупнейших и выдающихся университетов США.

1. Органичное соединение научной проблемной лаборатории, разработки которой были востребованы современными производственными задачами, с воспитанием научных кадров – аспирантура, докторантура.

2. Вовлечение студентов в работу проблемной лаборатории уже со 2-го-3-го курса и по достижении дипломного проектирования.

3. Исключительная демократичность взаимоотношений между коллегами и между преподавателями и студентами в сочетании с соблюдением строгой и неперменной субординации в работе.

4. Оригинальность воспитательного процесса, когда этот процесс шел не только в рамках учебного процесса, но и вне него: научные сотрудники проблемной лаборатории и преподаватели живо откликались на инициативы студентов организовать встречи с ними, как говорят сейчас, в неформальной обстановке. Это деятельность клуба теплофизиков в общезжитии, это “профессиональное” чествование преподавателей по завершении очередной крупной работы. Но при этом не было запанибратства, никогда не переступалась та тонкая грань, которая всегда оставляет преподавателя на той нравственной и профессиональной высоте, которую уважают и перед которой преклоняются ученики;

почитание зачинателей, традиция собираться теплофизическому "братству" в день памяти Г.М. Кондратьева и в канун Нового Года.

5. Высочайшая требовательность, которая предъявлялась как к научным исследованиям и инженерным проектам, так и к студенческим работам; как к нравственности и профессионализму преподавателей и сотрудников проблемной лаборатории, так и студентов.

6. Органичное сосуществование науки и производства: на кафедре был маленький, но всегда функционирующий участок станочного производства, а сам ЛИТМО обладал опытным заводом, который требовал соответствующего уровня инженерных разработок и оформления технической документации – все было реально, весомо, уважаемо. И чувство своей причастности к этому большому делу возвышало, позволяло ощущать свою значимость в жизни и в деле.

Щедрость души, бескорыстность, служение делу и обществу (а не персоне, как это часто требуется сейчас) – это окрыляло нас – молодых и периферийных. Этот запал жив в нас и по сей день – жить и делать, задаваясь вопросом: "Чего же я стою?" (В слове "стою" ударение на последнем слоге.) Говорят, что в современном мире есть две страны, после пребывания в которых, человек невольно (а также и сознательно) хочет и начинает жить по образу и подобию людей этих стран: США и Япония. Есть в моей жизни такая страна как кафедра теплофизики ЛИТМО, с которой всегда сверяла свою жизнь и деятельность... Жаль, что не довелось это сделать вместе с ней...

С любовью и сердечной признательностью аспирантка кафедры теплофизики ЛИТМО 1971-1974 года, кандидат технических наук, доцент кафедры "Информационные и вычислительные технологии" Кыргызско-Российского Славянского Университета, город Бишкек, стажер-исследователь университета Вашингтона в Сизтле, США, 2000 г.

Светлана Манжикова»

Материалы книги распределены между авторами следующим образом: биографический очерк о Г.М. Кондратьеве, главы 1–7, 11–13, 21–24 написаны Г.Н. Дульневым; глава 19 Г.Н. Дульневым и Н.А. Ярышевым с участием А.В. Шаркова; глава 25 В.Н. Васильевым; главы 14–17 Е.С. Платуновым; главы 8–10, 18, 20 Н.А. Ярышевым.

Библиография дана по разделам книги с последовательным обозначением в ссылках номера главы и порядкового номера в списке. Нумерация формул, таблиц и рисунков в тексте трехзначная и соответствует номеру главы, параграфа и порядкового номера в параграфе.

Литература

1. *Кондратьев Г.М.* Регулярный тепловой режим. М.: Госиздательство технико-теоретической литературы, 1954, 408 с.
2. *Кондратьев Г.М.* Тепловые измерения. Учебное пособие. М.– Л.: Машгиз, 1957, 244 с.
3. *Баранцев Р.Г.* На пути к мягкой математике // История и методики наук. Вып. 9, Пермь: Пермский госуниверситет, 2002. С.5-9.

ГЕОРГИЙ МИХАЙЛОВИЧ КОНДРАТЬЕВ (КРАТКИЙ ОЧЕРК)

«С Георгием Михайловичем – вспоминает Г.Н. Дульнев – я познакомился в 1949 году, будучи студентом 5 курса инженерно-физического факультета Ленинградского института точной механики и оптики. В то время мне пришлось работать в одной из лабораторий полупроводникового НИИ-34, занимавшимся созданием различных радиодеталей. Мне предложили в качестве дипломного проекта найти связь между температурой, условиями эксплуатации и конструкцией радиотехнических и полупроводниковых сопротивлений, а также объяснить, почему вольт-амперные характеристики термисторов имеют крайне нелинейный характер. Первые прикидки показали, что задача сводится в основном к установлению тепловых режимов этих деталей. Наиболее близкой к этим проблемам была кафедра тепловых приборов, к заведующему которой, Георгию Михайловичу Кондратьеву, я обратился с просьбой зачислить меня в число дипломников и позволить провести экспериментальные исследования в его лаборатории, на что получил одобрение. Так произошло первое знакомство, определившее как мою научную карьеру, так и во многом мою судьбу. Георгий Михайлович показался мне тогда пожилым человеком с хрестоматийными чертами русского интеллигента – доброжелательным, широко образованным, с тонким проявлением культуры при общении с людьми. Для нас – детей войны, познавших и нужду, и жестокость, и дефицит доброты и культуры, – встреча с таким человеком оставляла глубокое впечатление и желание чаще с ним видеться. В этом, наверное, и состоит разгадка непрерывной тяги к Георгию Михайловичу студентов, образовавших научный кружок, который в дальнейшем перерос в серьезную научную школу.»

Ниже представлены краткие сведения из биографии Г.М. Кондратьева – доктора технических наук, профессора ЛИТМО, заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, лауреата Сталинской премии.

Имя профессора Г.М. Кондратьева как ученого и педагога широко известно и популярно в нашей стране. Круг его научных интересов очень обширен, но ближе всего его творческие интересы были связаны с вопросами теплофизики, метрологии, тепловых и температурных измерений. Именно к этим областям знаний относятся его наиболее значитель

ные по научной ценности работы, создавшие ему имя одного из крупнейших специалистов в области теоретической теплотехники.

Г.М. Кондратьев родился в 1887 году в Крыму, в семье служащего. Свои школьные годы он провел в Петербурге. Здесь в 1912 году окончил с дипломом 1-й степени физико-математический факультет Санкт-Петербургского государственного университета, а с 1918 года, совмещая работу с учебой, занимался на физико-механическом факультете Петроградского политехнического института. Учителями Георгия Михайловича были такие выдающиеся ученые, как математик В.А. Стеклов, механик Е.Л. Николаи и теплофизик М.В. Кирпичев. Их влияние чувствовалось на научном творчестве Г.М. Кондратьева, сочетавшего в себе творческого математика с талантливым инженером-физиком.

Первую научную работу Георгий Михайлович выполнил еще будучи студентом университета. Это теоретическое исследование по бернуллиевым числам, к сожалению, осталось неопубликованным. Война 1914-1918 годов прервала его научную деятельность – он был призван в действующую армию и к научной работе смог вернуться только в 1922-1923 годах. В эти годы им было написано исследование в области аналитической механики “О собственных колебаниях стержня с круговой осью”.

Вся дальнейшая научная деятельность Г.М. Кондратьева была преимущественно связана с различными вопросами теплопередачи и метрологии. С 1924 года Георгий Михайлович заведует термометрической лабораторией низких температур в Главной палате мер и весов – ныне Научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева (ВНИИМ), где в последние годы руководил отделом тепловых измерений. Исследования Георгия Михайловича и его учеников в области термометрии способствовали установлению в СССР и внедрению в практику Международной температурной шкалы, обеспечивающей единство температурных измерений в промышленности и науке. В связи с этими исследованиями Георгий Михайлович неоднократно принимал участие в работе Международного комитета по термометрии в качестве представителя СССР.

В 1927 году, не прерывая работы во ВНИИМ, Георгий Михайлович по приглашению академика М.В. Кирпичева принимает участие в работах Государственной физико-технической лаборатории (ныне – Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН). Его исследования в эти годы относятся к различным вопросам теплотехники и теплофизики. В этот период им были разработаны основы теории регулярного теплового режима (вторая группа работ Г.М. Кондратьева).

Теория регулярного теплового режима – одно из крупных достижений Советской науки – нашла широкое применение в технической физике и при-

вела к созданию новой техники тепловых измерений и к оригинальным методам тепловых расчетов. Уже в конце двадцатых годов новые методы исследования теплофизических параметров, предложенные Георгием Михайловичем, нашли признание в ряде организаций и научно-исследовательских институтов страны. В эти годы советские специалисты-энергетики крайне нуждались в простых методах и приборах, позволяющих быстро измерять теплофизические параметры различных изоляционных материалов. Существовавшие в то время зарубежные образцы приборов были основаны преимущественно на использовании стационарного теплового потока, что требовало длительного времени для проведения испытаний, высококвалифицированного обслуживающего персонала. К тому же эти приборы имелись лишь в очень немногих физических лабораториях страны.

Теория регулярного теплового режима позволила принципиально по-новому подойти к вопросу измерения теплофизических параметров. Методы, основанные на этой теории, дали возможность производить измерения быстро, просто и надежно. Создание приборов регулярного режима стало под силу многим теплофизическим лабораториям.

В этот период во многих учреждениях Ленинграда под непосредственным наблюдением и при участии Георгия Михайловича применялись его методы и приборы (ЦКТИ, Институт гигиены труда и профзаболеваний, Всесоюзный научно-исследовательский институт огнеупоров, Ленэнерго, трест “Теплоизоляция” и др.).

В 1936 году вышла в свет монография Г.М. Кондратьева “Испытание на теплопроводность по методам регулярного режима”, где был обобщен опыт применения теории регулярного режима в различных лабораториях страны. Основное свое внимание Георгий Михайлович продолжал уделять проблеме теплопередачи в твердом теле; в 1939 году на ученом совете Московского энергетического института он защитил докторскую диссертацию на тему “Испытание на теплопроводность по методам регулярного режима”.

За разработку новых методов и приборов для измерения теплофизических параметров профессор Г.М. Кондратьев в 1948 году был удостоен Сталинской премии. Большое внимание вопросам теплопередачи в твердом теле он уделял и в послевоенный период своей научной деятельности (1945-1958 года). Обобщением большого цикла работ в этой области явилась его обширная монография “Тепловой регулярный режим” (1954 год) [1]. По своему содержанию она остается единственной в мировой литературе.

Третья группа работ Георгия Михайловича была посвящена другой важной проблеме – теплообмену теплокровных организмов с окружающей

средой, над которой он работал, начиная с 1934 года. Методы изучения теплозащитных свойств тканей, одежды и обуви, предложенные Г.М. Кондратьевым, нашли широкое применение во многих научно-исследовательских институтах. В эти годы под его руководством в Ленинградском институте точной механики и оптики был создан ряд специальных приборов, позволяющих оценивать теплозащитные свойства тканей и комплектов одежды, предназначенной для людей, работающих в особо сложных условиях. Теоретические работы Георгия Михайловича в этом направлении привели к разработке инженерных методов расчета теплозащитных свойств одежды. Им во взаимосвязи рассмотрен ряд сложных явлений: выделение тепла организмом человека, находящегося в различных состояниях и выполняющего различную работу; процесс теплопередачи через одежду и влияние окружающей среды на этот процесс.

Четвертая часть его работ касалась вопросов калориметрии. Исследование физических процессов, протекающих в классическом тепловом приборе – калориметре смешения привело к разработке теории этих процессов, к ценным практическим указаниям по конструированию и эксплуатации калориметра смешения [3]. Г.М. Кондратьевым разработан и его учениками усовершенствован микрокалориметр – простой прибор для определения истинной теплоемкости небольших проб различных материалов. Под его руководством в Ленинградском институте точной механики и оптики была создана в 1952-1953 годах оригинальная установка, позволяющая по-новому измерять истинную теплоемкость металлов в широком интервале температур [4]. В 1957-1958 годах там же был разработан новый метод и сконструирован прибор, позволяющий измерять тепловыделения и газообмен различных теплокровных организмов, находящихся в нормальном и патологическом состояниях [5]. Перечисленные здесь приборы получили высокую оценку и применяются во многих научно-исследовательских учреждениях страны.

Практически важны и актуальны исследования Г.М. Кондратьева и его учеников по созданию новых методов измерения температуры расплавленных металлов, пламен. Особо следует выделить цикл по проблеме тепловой инерции различных термоприемников. Предложенные им методы оценки тепловой инерции вошли в практику различных учреждений и нашли отражение в соответствующих ГОСТах (см. раздел четвертый настоящей книги).

Научная работа Георгия Михайловича тесно переплетается с его педагогической деятельностью. Начиная с 30-х годов, он читает лекции по ряду специальных дисциплин сначала в Ленинградском политехническом институте, затем в Ленинградском институте холодильной промыш-

ленности. Наиболее плодотворный период Г.М. Кондратьева связан с его работой в Ленинградском институте точной механики и оптики, где, начиная с 1938 года до последних дней (1958), он заведовал кафедрой тепловых приборов, а с 1948 по 1952 год еще и возглавлял инженерно-физический факультет ЛИТМО.

Георгий Михайлович широко привлекал студентов к научной работе кафедры, много времени уделял формированию научного мировоззрения своих учеников, внимательно следил за их работой и после окончания института или аспирантуры. С большим присущим ему тактом поправлял ошибки своих учеников и студентов, всегда помогал в трудную минуту добрым советом. Большая человечность Георгия Михайловича снискала ему славу в институте и далеко за его пределами. Этим, в частности, объясняется стремление многих молодых работников – студентов старших курсов, инженеров, аспирантов – работать в руководимом им коллективе.

Георгий Михайлович неоднократно говорил, что воспитание молодых научных кадров для него дело первостепенной важности, и к этому почетному делу он относился с той же обстоятельностью и мудростью, как и к своей научной работе. В 1957 году вышло в свет учебное пособие Г.М. Кондратьева «Тепловые измерения» [2].

Научную и педагогическую деятельность Г.М. Кондратьев совмещал с большой общественной работой. С 1932 года Георгий Михайлович состоял председателем Теплоизоляционной секции ВНИТО «Энергетик». За время существования секции при непосредственном участии Георгия Михайловича объединена работа в области теплоизоляции различных отраслей промышленности. По его личной инициативе уже в послевоенные годы были созданы всесоюзные конференции по теплоизоляции, работа которых была направлена на широкий обмен опытом представителей промышленности и науки, на дальнейший технический прогресс в теплоизоляционной промышленности. Своей общественной работой Георгий Михайлович снискал глубокое уважение и популярность среди широких кругов техников, инженеров и научных работников. Большую работу проводил Георгий Михайлович по содружеству с промышленностью: он был руководителем и инициатором многих исследований для промышленности, постоянно консультировал заводских работников, живо интересовался их запросами и нуждами.

В Ленинградском институте точной механики и оптики, во Всесоюзном научно-исследовательском институте метрологии вместе с Георгием Михайловичем работала большая группа учеников, многие из которых стали кандидатами и докторами наук. Георгий Михайлович с исключительной отзывчивостью относился к своим сотрудникам, проявляя к ним забо-

ту и внимание; в то же время он был принципиальным и беспристрастным в оценке их деятельности. Такие понятия, как честь, порядочность, обязательства интеллигентного человека перед Родиной были для него органичными, служили нравственной опорой в тяжкие минуты испытаний, являясь основой во взаимоотношениях с людьми, и служили критериями для оценки как своих, так и чужих поступков.

В марте 1957 года Г.М. Кондратьев был утвержден руководителем проблемной научно-исследовательской лаборатории, созданной в ЛИТМО при руководимой им кафедре. В коллектив влились новые сотрудники, была создана прекрасная материальная база для научных исследований. В это время все мы – сотрудники Георгия Михайловича – еще раз почувствовали всю широту научных замыслов нашего учителя. Общая проблема, над которой в последние годы работал Георгий Михайлович и его ученики, относилась к вопросам теплообмена в приборостроении и в других областях науки и техники.

В марте 1958 года при Ленинградском институте точной механики и оптики по инициативе ряда специалистов из различных городов была проведена 1-я Всесоюзная межвузовская конференция по регулярному тепловому режиму. В работе конференции принимали участие специалисты из многих городов Советского Союза, а также зарубежные гости.

Георгий Михайлович неоднократно участвовал в работе международных научных организаций, читал лекции в высших учебных организациях других стран. Большая культура, эрудиция, глубокое знание специальных вопросов, гуманность и широта взглядов позволяли Г.М. Кондратьеву быть достойным представителем советской науки.

Г.М. Кондратьев провел большую работу по организации и выпуску журнала «Известия высших учебных заведений МВО СССР. Приборостроение» и был его первым главным редактором.

За успешную научную, педагогическую и общественную работу Г.М. Кондратьев был награжден орденом Ленина, орденом Красной Звезды и медалями «За доблестный труд в Великой Отечественной войне» и «За оборону Ленинграда», был представлен к почетному званию «Заслуженный деятель науки и техники РСФСР».

Литература

1. *Кондратьев Г. М.* Регулярный тепловой режим. М.: ГИТТЛ, 1954. – 408 с.
2. *Кондратьев Г. М.* Тепловые измерения, Машгиз, 1957. – 244 с.
3. *Кондратьев Г. М.* Металлический шаровой блок калориметр смешения свободно охлаждаемый//Исследования в области тепловых измерений и приборов (сборник статей), вып. 21, Л.: ЛИТМО, 1957. С. 48-76.
4. *Лазарев А.И.* Абсолютный метод измерения теплоты затвердевания металлов в твердом и жидком состоянии//Исследования в области тепловых измерений и приборов (сборник статей), вып. 21, Л.: ЛИТМО, 1957. С. 19-21.
5. *Миндлин А.М.* Установка для измерения мощности переменных источников энергии и ее применение в биокалориметрии//Изв. ВУЗов. Приборостроение, т. 1, №2, 1958.

РАЗДЕЛ ПЕРВЫЙ. РЕГУЛЯРНЫЙ ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ

Введение

Теория регулярного теплового режима в отличие от обычной теории теплопроводности рассматривает процессы нагревания и охлаждения тел не на всем протяжении процесса, а только в той стадии, на которую перестало влиять начальное состояние тела. Обычно в теории теплопроводности это состояние предполагается определенным, заданным, тогда как в теории регулярного режима это условие ослаблено. Рассматривается объект, который при этом может быть не только телом разной конфигурации, но и системой тел. Обычная же теория теплопроводности ограничивается изучением температурного поля однородных тел или систем тел простой формы.

Теория регулярного режима возникла и развивалась из требований практики, начиная с 1928 года, когда перед ее автором Георгием Михайловичем Кондратьевым была поставлена задача, связанная с испытанием энергетического оборудования и определением свойств теплоизоляционных материалов [1.2, 1.3]. В дальнейшем эти работы продолжились во Всесоюзном научно-исследовательском институте (ВНИИМ) им. Д. И. Менделеева, где основное внимание уделялось проблемам метрологии температурных и тепловых измерений и в Ленинградском институте точной механики и оптики, в настоящее время это – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики. По мере развития проблематика расширялась и охватила задачи как теории регулярного режима, так и других методов анализа тепловых процессов в различных объектах приборостроения (радиоэлектронные, гироскопические, оптико-электронные устройства и так далее) [1.3, 1.4].

В настоящий момент теория регулярного режима стала полезным орудием при решении многих практических задач. Основные положения этой теории не являются результатом одних только аналитических операций: они вместе со своими следствиями позволили обобщить резуль-

таты огромного количества опытов, проводившихся экспериментаторами в разных учреждениях в течение десятков лет.

Теория регулярного теплового режима – одно из многих достижений российской науки: хотя зарубежные ученые изредка пользовались частными случаями регулярного режима, они не дошли до обобщений и широких выводов.

ГЛАВА 1. ЭЛЕМЕНТАРНАЯ ТЕОРИЯ ТЕПЛОЙ ИНЕРЦИИ ТЕЛ

1.1. Вывод основного уравнения

Рассмотрим тепловые процессы в теле, когда его температурное поле, оставаясь равномерным по объему, изменяется благодаря внутренним источникам теплоты равномерно и изменяется во времени благодаря внутренним источникам мощностью $P(\tau)$, либо переменной температуре $t_c(\tau)$ внешней среды. Теория показывает, а опыт подтверждает, что система не мгновенно реагирует на изменение мощности источников или температуры среды, а с запаздыванием. На рис. 1.1.1 представлена кривая $abcd$, изображающая изменение температуры t тела, а кривая $ABCD$ – изменение температуры среды t_c . Эти кривые не совпадают, хотя могут иногда пересекаться в некоторых точках. Так на кривой рис. 1.1.1 в точке C температура среды достигла максимума, а температура тела все еще продолжает подниматься. Явление этого отставания температуры тела t от температуры среды t_c называют тепловой или термической инерцией (инерционностью). Выведем основное уравнение элементарной теории тепловой инерции тел, относящееся к рассматриваемому случаю распределения температуры в объеме тела.

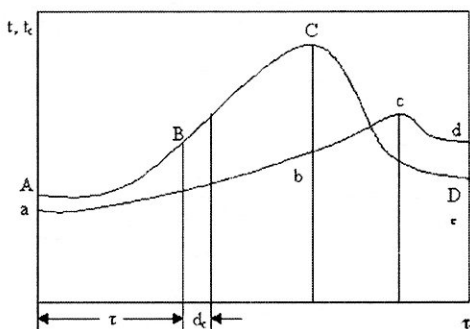


Рис. 1.1.1

За бесконечно малый промежуток времени $d\tau$ температура тела упала на dt , а энтальпия dQ тела изменилась на величину

$$dQ_1 = -Cdt,$$

где C – полная теплоемкость тел.

За это же время из-за действия внутренних источников энергии выделяется дополнительная теплота $P dt$. Количество приобретенной телом теплоты

$$dQ_2 = -C dt + P dt,$$

рассеивающегося в окружающую среду, на основании закона Ньютона равно

$$dQ_3 = \alpha S(t - t_c) dt,$$

где α, S — коэффициент теплоотдачи тела и его площадь теплоотдающей поверхности.

Приравнявая на основании закона сохранения энергии количество тепла $dQ_2 = dQ_3$, получаем дифференциальное уравнение, связывающее t, t_c и P

$$\frac{dt}{dt} + mt = \frac{P}{C} + mt_c, \quad m = \frac{\alpha S}{C}. \quad (1.1.1)$$

Уравнение (1.1.1) сохраняет тот же вид, если тело в течение времени dt получает теплоту от среды.

Запишем начальные условия задачи: в момент времени $\tau = 0$ температура тела, среды и мощность внутренних источников соответственно равны

$$t_{\tau=0} = t_0, \quad t_{ct=0} = 0, \quad P_{\tau=0} = 0. \quad (1.1.2)$$

1.2. Решение основного уравнения тепловой инерции

Представим $t = W \cdot V$, где W и V неизвестные пока функции времени τ , и подставим это выражение в (1.1.1)

$$W \left(\frac{dV}{d\tau} + mV \right) + V \frac{dW}{d\tau} - mt_c - \frac{P}{C} = 0. \quad (1.2.1)$$

Выберем функцию $V = V(\tau)$ так, чтобы сумма в скобках обратилась в нуль

$$\frac{dV}{d\tau} + mV = 0,$$

тогда для W получим легко интегрируемое уравнение

$$\frac{dW}{d\tau} = \frac{m}{V} t_c + \frac{P}{C}. \quad (1.2.2)$$

Из предшествующего ему уравнения следует, что $\ln V + m\tau = \text{const}$ и $V = A_1 e^{m\tau}$, где A_1 — постоянная интегрирования. Уравнение (1.2.1) приобретает форму

$$\frac{dW}{d\tau} = \frac{m}{A_1} e^{m\tau} \left[t_c(\tau) + \frac{P}{C} \right].$$

откуда

$$W = \frac{m}{A_1} \int e^{m\tau} \left[t_c(\tau) + \frac{P}{C} \right] d\tau + A_2,$$

A_2 — новая постоянная.

Окончательно находим, что $t = V \cdot W$ [1.4, 1.8]

$$t = A_1 e^{-m\tau} \left\{ \frac{m}{A_1} \int e^{m\tau} \left[t_c(\tau) + \frac{P}{C} \right] d\tau + A_2 \right\}.$$

Обозначим $A_1 A_2 = A$, получим

$$t = e^{-m\tau} \left\{ D + m \int e^{m\tau} \left[t_c(\tau) + \frac{P}{C} \right] d\tau \right\}. \quad (1.2.3)$$

Из начального условия (1.1.2) находим

$$t_0 = D e^{-m\tau_0}$$

и запишем выражение (1.2.3) в следующем виде

$$t = t_0 e^{-m(\tau - \tau_0)} + m e^{-m\tau} \int_{\tau_0}^{\tau} e^{m\tau} \left[t_c(\tau) + \frac{P(\tau)}{C} \right] d\tau.$$

Применим к интегралу в правой части формулу интегрирования по частям, тогда после ряда преобразований получим

$$t - t_c = (t_0 - t_{c0}) e^{-m(\tau - \tau_0)} - e^{-m\tau} \int_{\tau_0}^{\tau} e^{m\tau} \left[\frac{dt_c}{d\tau} + \frac{dP}{C} \right] d\tau. \quad (1.2.4)$$

Эта форма записи решения удобна для практических приложений.

1.3. Первый типичный случай проявления тепловой инерции: простое нагревание или охлаждение тела

Рассмотрим случай, когда температура среды t_c – постоянная, а внесенное в нее тело имеет в начальный момент времени иную температуру t_0 . Опыт показывает, что тело начнет нагреваться или охлаждаться, и его температура t начинает асимптотически приближаться к температуре среды (рис. 1.3.1.). Это случай простого нагревания (или охлаждения) тела [1.4]. Изложенная в первом разделе теория дает уравнения кривой охлаждения. Полагая в уравнении (1.2.3) $t_c = \text{const}$, $\tau_0 = 0$ и учитывая отсутствие внутренних источников энергии $P = 0$, получаем формулу изменения температуры тела

$$t - t_c = (t_0 - t_c) e^{-m\tau}. \quad (1.3.1)$$

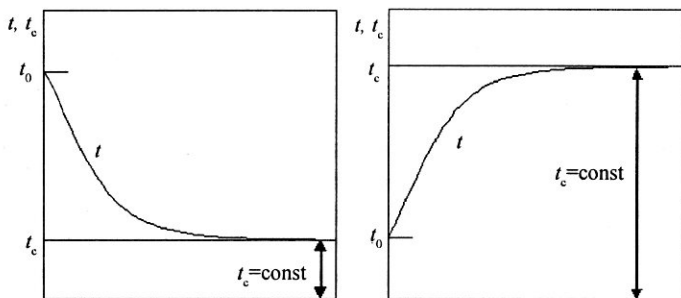


Рис. 1.3.1

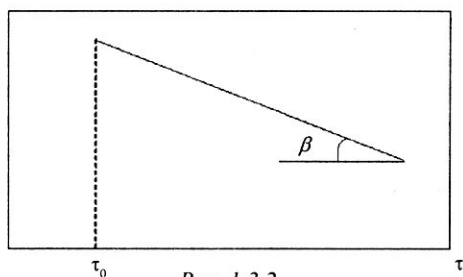


Рис. 1.3.2

Введем вместо величины m обратную величину

$$\varepsilon = \frac{1}{m} = \frac{C}{S\alpha} \quad (1.3.2)$$

и прологарифмируем формулу (1.3.1) по τ , тогда

$$\ln|t - t_c| = -\frac{\tau}{\varepsilon} + \text{const.} \quad (1.3.3)$$

Из (1.3.3) видно, что эта зависимость в полулогарифмических координатах $\ln(t - t_c)$ от времени τ изображается прямой линией (рис. 1.3.2).

Для любых значений t и t_c , как это следует из (1.3.3), будут получаться прямые с одинаковым углом наклона β , тангенс которого равен

$$\ln \frac{\vartheta_1}{\vartheta_2} / \tau_2 - \tau_1 = \frac{1}{\varepsilon} = m.$$

Применим к интегралу в правой части формулы (1.2.3) обобщенную теорему о среднем [1.8]:

$$e^{-m\tau} \int_{\tau_0}^{\tau} e^{m\tau} t'_c(\tau) d\tau = e^{-m\tau} t'_c(\xi) \int_{\tau_0}^{\tau} e^{m\tau} d\tau = t'_c(\xi) \frac{1 - e^{-m(\tau - \tau_0)}}{m},$$

где ξ заключено между τ_0 и τ : $\tau_0 < \xi < \tau$.

Тогда, если только производная

$$\frac{dt_c}{d\tau} = t'_c(\tau)$$

не принимает бесконечных значений (а они не имеют физического смысла), то по мере увеличения $(\tau - \tau_0)$ и устремления $\exp(-m(\tau - \tau_0))$ к нулю формула (1.2.3) принимает простой вид:

$$t - t_c = -\varepsilon t'_c(\xi). \quad (1.3.4)$$

Из этого выражения следует, что тепловая инерция (или отставание температуры тела от температуры среды) пропорциональна скорости изменения температуры среды.

1.4. Второй случай: нагревание тела в среде с линейно изменяющейся во времени температурой

Пусть температура среды линейно изменяется во времени, то есть

$$t_c = b(t - t_0) + t_{c0} \quad \text{или} \quad \frac{dt_c}{d\tau} = b = t'_c = \text{const.} \quad (1.4.1)$$

тогда на основе (1.2.3)

$$t - t_c = -b\varepsilon + (t_0 - t_{c0} + b\varepsilon)e^{-m(\tau - \tau_0)} \quad (1.4.2)$$

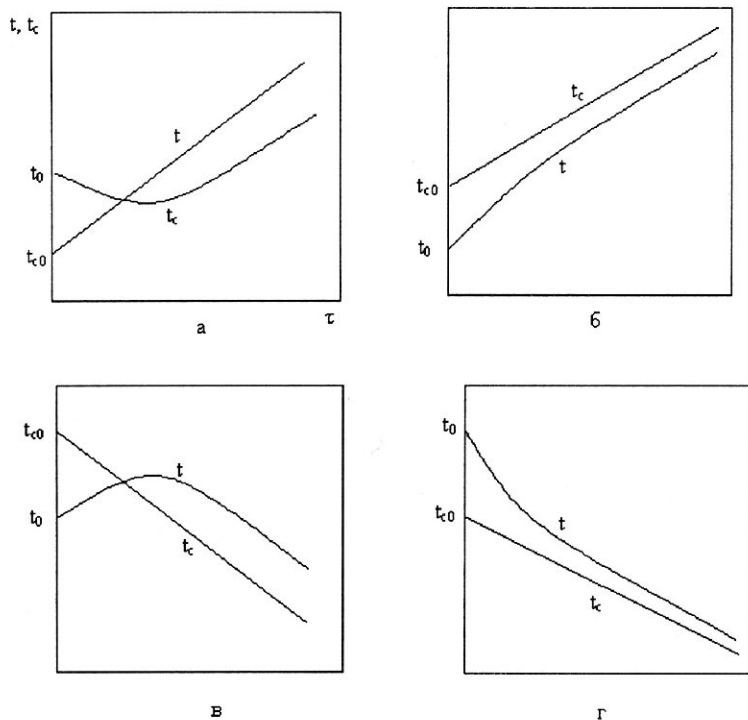


Рис. 1.4.1

Графические представления разновидностей режимов этого рода даны на рис. 1.4.1. Из них при $\tau \rightarrow \infty$ следует, что возможны случаи, когда кривые t и t_c пересекаются. С ростом времени зависимость (1.4.2) упрощается [1.4]

$$t - t_c = -b\varepsilon. \quad (1.4.3)$$

1.5. Третий случай: температура среды изменяется во времени по гармоническому закону

Рассмотрим теплообмен тела при простом гармоническом изменении температуры среды:

$$t_c = t_{cm} + A \cos \frac{2\pi\tau}{T} = t_{cm} + A \cos \omega\tau, \quad \omega = \frac{2\pi}{T}. \quad (1.5.1)$$

где t_{cm} – среднее значение температуры среды, около которой происходит ее колебание; T – период колебаний; ω – частота колебаний (рис. 1.5.1).

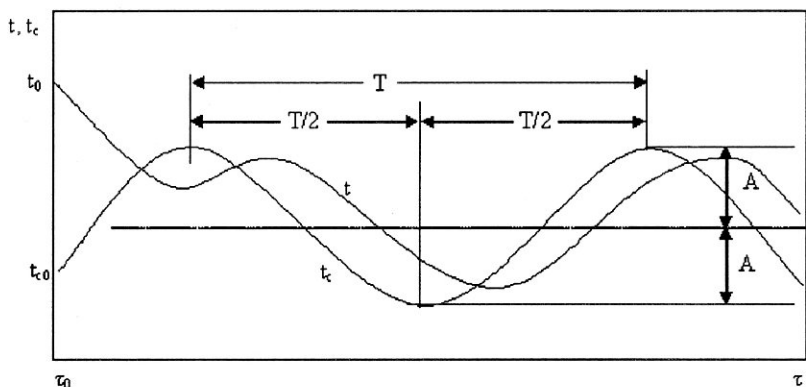


Рис. 1.5.1

Применим для отыскания разности температур $(t - t_c)$ общую формулу (1.2.3); так как

$$t'_c(\tau) = -A\omega \sin \omega\tau,$$

то

$$t - t_c = (t_0 - t_{c0})e^{-m(\tau - \tau_0)} + A\omega e^{-m\tau} \int_{\tau_0}^{\tau} e^{m\tau} \sin \omega\tau d\tau. \quad (1.5.2)$$

Интеграл в правой части этого равенства берется по известной формуле

$$\int e^{ax} \sin(bx - c) dx = \frac{e^{ax}}{a^2 + b^2} [a \sin(bx + c) - b \cos(bx + c) + \text{const}],$$

из которой следует

$$\int_{\tau_0}^{\tau} e^{m\tau} \sin \omega \tau d\tau = \frac{e^{m\tau}}{m^2 + \omega^2} \left[m \sin \omega \tau - \omega \cos \omega \tau \right]_{\tau_0}^{\tau}.$$

Для упрощения введем угол β , меняющийся в пределах от 0 до $\pi/2$, определяя его равенством

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\omega}{m} = \frac{2\pi}{T} \varepsilon, \quad \beta = \operatorname{arctg} \left(\frac{2\pi \varepsilon}{T} \right), \quad (1.5.3)$$

и величину

$$A^* = \frac{A\omega}{\sqrt{m^2 + \omega^2}} = A \sin \beta. \quad (1.5.4)$$

Тогда выражение (1.5.2) преобразуется к виду

$$t - t_c = (t_0 - t_{c0}) e^{-m(\tau - \tau_0)} + A^* e^{-m\tau} \left[e^{m\tau} \sin \omega \tau \cos \beta - e^{m\tau} \cos \omega \tau \sin \beta - (e^{m\tau_0} \sin \omega \tau_0 \cos \beta - e^{m\tau_0} \cos \omega \tau_0 \sin \beta) \right]$$

или

$$t - t_c = (t_0 - t_{c0}) e^{-m(\tau - \tau_0)} + A^* \left[\sin(\omega \tau - \beta) - e^{-m(\tau - \tau_0)} \sin(\omega \tau_0 - \beta) \right],$$

то есть

$$t - t_c = \left[t_0 - t_{c0} - A^* \sin(\omega \tau_0 - \beta) \right] e^{-m(\tau - \tau_0)} + A^* \sin(\omega \tau - \beta). \quad (1.5.5)$$

На рис. 1.5.1 изображено изменение температур t и t_c вблизи начального момента времени. По мере увеличения времени первое слагаемое в правой части (1.5.5) убывает, поэтому изменение разности температур принимает простую форму

$$t - t_c = A^* \sin(\omega \tau - \beta). \quad (1.5.6)$$

Более наглядное представление о колебаниях t получим, если сравним колебания температур t_c и t около t_{cm} . Для этого в последней формуле заменим t_c через его выражение (1.5.1), а A^* через $A \sin \beta$. Получим

$$\begin{aligned} t - t_{cm} - A \cos \omega \tau &= A \sin \beta \sin(\omega \tau - \beta) = \\ &= A (\cos \omega \tau + \sin \beta \sin \omega \tau \cos \beta - \sin^2 \beta \cos \omega \tau). \end{aligned}$$

Простое преобразование приводит к выражению

$$t - t_{cm} = B \cos \left(\frac{2\pi}{T} \tau - \beta \right), \quad B = A \cos \beta. \quad (1.5.7)$$

На рис. 1.5.2 изображены колебания температур среды и тела, для удаленных от начала моментов времени; амплитуды колебаний температуры тела в $\cos\beta$ раз меньше амплитуды колебаний температуры среды; отставание по фазе дано величиной β , которая зависит от периода колебаний T и от постоянной тепловой инерции тела ϵ .

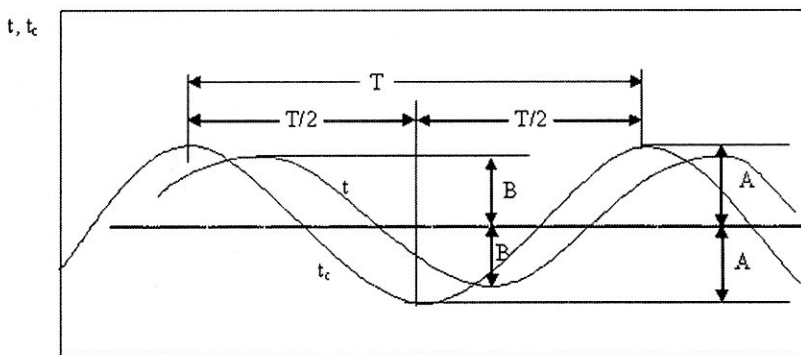


Рис. 1.5.2

Из анализа формул (1.3.1), (1.3.3), (1.4.3), (1.5.3), (1.5.7) видно, какую важную роль играет параметр тепловой инерции ϵ . Для постоянной температуры среды он всецело определяет быстроту приближения тела к тепловому равновесию со средой; в двух других случаях параметр, выражающий тепловую инерционность, по истечении некоторого времени становится прямо пропорциональным ϵ . Итак,

в I случае ($t_c = \text{const}$) имеем ϵ ;

во II случае ($dt_c/dt = \text{const}$) имеем $b \cdot \epsilon$;

в III случае (когда t_c колеблется по синусоидальному закону) имеем $\omega_2 = \epsilon \cdot 2\pi/T$;

а вообще, как следует из (1.1.2), отставание температуры тела от температуры среды

$$t - t_c = -\epsilon \frac{dt_c}{dt}.$$

Здесь dt_c/dt зависит от закона изменения температуры среды t_c от времени, а отставание температур тела и среды пропорционально ϵ . Последняя величина не зависит ни от времени, ни от изменения t_c .

Введем важное понятие о “времени установления системы” Z . В первом простейшем случае тепловой инерции ($t_c = \text{const}$) под “временем установления системы” Z понимают то время, по истечении которого раз-

ность $|t - t_c|$ температур тела (системы) и среды станет меньше заданной величины Δ (например, 0,1 °С). Часто под Δ понимают ту небольшую разность температур, которая находится на пределе точности измерений наших приборов. Это время Z определяется с помощью формулы (1.3.1), в которой следует положить $\tau - \tau_0 = Z$, $|t - t_c| = \Delta$, а $t_0 - t_c$ считать заданным; тогда

$$Z = \varepsilon \cdot \ln \frac{t_0 - t_c}{\Delta} \quad (1.5.8)$$

Рассмотренные выше три случая тепловой инерции тел в литературе часто именуют регулярным режимом первого, второго и третьего рода. Слово “регулярный” в данном случае означает “правильный” в том смысле, что в данном режиме перестают влиять значения начальных температур тела и среды, и в последующие моменты времени температуры тела и среды следуют четким законам.

ГЛАВА 2. ТЕОРИЯ РЕГУЛЯРНОГО ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА

2.1. Основная теорема теории регулярного теплового режима

В конце первой главы упоминалось о регулярном тепловом режиме тел с равномерным полем температур. Рассмотрим общий случай теплового режима тел с неравномерным температурным полем. Пусть однородное изотропное тело произвольной конфигурации в начальный момент времени $\tau = 0$ имеет неравномерное по объему поле температур $f(x, y, z)$, то есть избыточное поле температур равно

$$\vartheta(x, y, z, 0) = t(x, y, z, 0) - t_c = f(x, y, z), \quad (2.1.1)$$

и находится в среде с постоянной температурой t_c . Теплообмен этого тела со средой подчиняется закону Ньютона, тогда при отсутствии на поверхности этого тела источников или стоков теплоты справедливо условие:

$$\left(\frac{\partial \vartheta}{\partial n} + \frac{\alpha}{\lambda} \vartheta \right)_S = 0, \quad (2.1.2)$$

где n – внешняя нормаль к поверхности S тела, λ – коэффициент теплопроводности тела; α – коэффициент теплоотдачи.

Температурное поле $\vartheta(x, y, z, \tau)$ тела описывается уравнением Фурье [1.6]

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} = a \nabla^2 \vartheta, \quad (2.1.3)$$

где ∇^2 – оператор Лапласа в прямоугольной системе координат

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2},$$

$a = \lambda / (c\rho)$ – температуропроводность тела; c – удельная теплоемкость; ρ – плотность материала тела.

Если уравнение теплопроводности (2.1.3) имеет решение, удовлетворяющее граничному условию (2.1.2) и начальному (2.1.1), то это решение единственное. Для его нахождения можно использовать классический метод, указанный Фурье, согласно которому сперва ищется частное

решение $\mathfrak{S}_{\text{частн}}$ уравнения (2.1.3) в виде произведения двух функций

$$\mathfrak{S}_{\text{частн}} = U \cdot T; \quad (2.1.4)$$

где $U(x, y, z)$ – функция только координат, $T(\tau)$ – функция только времени. Подставим (2.1.4) в уравнение (2.1.3) и получим:

$$aT^2 \nabla^2 U = U \cdot \frac{dT}{d\tau}, \quad \text{или} \quad \frac{\nabla^2 U}{U} = \frac{dT}{d\tau} \cdot \frac{1}{aT},$$

то есть оказывается, что левая часть этого уравнения зависит только от координат, а правая – от времени, что возможно лишь при условии, что правая и левая части сводятся к одному и тому же постоянному числу. Последнее может быть, как показывает анализ, только отрицательным, обозначаем его $(-\mu^2)$; тогда

$$\frac{\nabla^2 U}{U} = \frac{dT}{d\tau} \cdot \frac{1}{aT} = -\frac{\mu^2}{L^2}, \quad (2.1.5)$$

где L – размер тела, введение которого позволяет сохранить размерность всех частей уравнения (2.1.5).

Отсюда получаем

$$\frac{dT}{d\tau} = -a \frac{\mu^2}{L^2} T$$

и, обозначив

$$a \frac{\mu^2}{L^2} = m, \quad \text{или} \quad \mu = L \sqrt{\frac{m}{a}}, \quad (2.1.6)$$

приходим к экспоненциальному выражению для T

$$T = A e^{-m\tau}, \quad (2.1.7)$$

где m – величина положительная, A – постоянная интегрирования.

Из (2.1.5) получим уравнение в частных производных для U :

$$\nabla^2 U + \frac{m}{a} U = 0. \quad (2.1.8)$$

Предположим, что найден ряд его частных решений: $U_0, U_1, \dots, U_j, \dots$, которые получим, придавая m значения m_0, m_1, \dots . Соответствующие им функции T будут:

$$A_0 e^{-m_0 \tau}, A_1 e^{-m_1 \tau}, \dots, A_j e^{-m_j \tau}, \dots$$

Так как уравнение Фурье линейное, то сумма частных его решений будет решением уравнения (2.1.3):

$$\vartheta = \sum_{j=0}^{\infty} \vartheta_j = \sum_{j=0}^{\infty} A_j U_j e^{-m_j \tau}. \quad (2.1.9)$$

Однако эти решения только тогда представляют интерес, если они подчинены граничным условиям (2.1.2); это налагает некоторые условия и на величины m_j .

Подставим одно из частных решений (2.1.9) в уравнение (2.1.2)

$$\left(\frac{\partial U_j}{\partial n} + \frac{\alpha}{\lambda} U_j \right)_S = 0. \quad (2.1.10)$$

Условие (2.1.10) приводит к бесчисленному множеству корней и дает последовательность возрастающих значений для параметров m_j . Уравнение (2.8) называют характеристическим, а функции U_j , являющиеся частными решениями этого уравнения – характеристическими или собственными функциями задачи, а числа μ называют собственными числами уравнения.

В 1901 году французский математик Буссинеск сформулировал следующее основное положение [1.5]:

Общий интеграл Фурье для задачи охлаждения однородного и изотропного тела любой формы выражается бесконечным рядом, члены которого расположены по экспоненциальным, быстро убывающим функциям времени, а именно:

$$\vartheta = A_0 U_0 e^{-m_0 \tau} + A_1 U_1 e^{-m_1 \tau} + \dots, \quad (2.1.11)$$

так, что положительные параметры m_0, m_1, \dots представляют собою последовательность всегда возрастающих дискретных величин:

$$0 < m_1 < m_2 < \dots; \quad (2.1.12)$$

U_0, U_1, \dots – функции координат точек тела; A_0, A_1, \dots – постоянные, не зависящие ни от времени, ни от координат. Функции U_j удовлетворяют граничным условиям (2.1.2).

Общий интеграл должен еще удовлетворять начальному условию (2.2.1), он примет вид:

$$\sum_{j=0}^{\infty} A_j U_j = f_0(x, y, z), \quad \text{т.к.} \quad e^{-m_j \tau} \Big|_{\tau=0} = 1. \quad (2.1.13)$$