

Ю. ИВАНОВ

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУЕВЫХ ПРОЦЕССОВ*

Теплофизические исследования струевых процессов были начаты в Институте термофизики и электрофизики (в то время — Институт энергетики) АН ЭССР двенадцать с половиной лет тому назад — в начале 1953 г.

Чтобы лучше понять настоящее, а тем более будущее направление исследований в этой области, полезно обратиться к истории их возникновения, проследить закономерность путей их развития и в какой-то мере критически оценить пройденный путь.

Прежде всего возникает вопрос, почему в рамках тогда еще технического института возникло и получило дальнейшее развитие физико-техническое направление исследований. Произошло это не случайно, а в результате определенных потребностей развития самой науки и развивающегося производства. Нельзя не отметить, что физико-техническое направление исследований, выросшее из технически осознанного опыта научно-исследовательской работы, зародилось и установилось в борьбе с эмпиризмом. Системе эмпирического исследования противопоставляется методология научного исследования, основанная на диалектическом изучении рабочего процесса как совокупности составляющих его физических явлений в их взаимодействии.

Для лучшего понимания этого направления исследований полезно остановиться на некоторых особенностях.

Благодаря усилиям ряда выдающихся ученых различных специальностей в нашей стране к середине 20-х годов текущего столетия начало складываться новое направление исследований, сущность которого заключалась в следующем. В то время как в инженерно-технических лабораториях изучались машины, аппараты и технологические установки в целом, в лабораториях физико-технического направления проводились исследования тех физических явлений, из которых слагаются рабочие процессы технических устройств.

Преимущество такого направления исследований заключается в возможности более подробного анализа выделенного физического явления и применения более точных методов исследования, присущих физическим лабораториям. Не приходится говорить, что в ряде случаев этот путь является единственно возможным, позволяющим изучить сложный процесс путем выделения из него ряда последовательных более простых явлений. Такой путь исследования одновременно и более плодотворен с точки зрения использования полученных результатов. В то время как данные, полученные от испытания какой-нибудь промышленной уста-

* Статья представляет собой сокращенное изложение доклада, прочитанного на сессии Отделения физико-математических наук АН ЭССР 24 июня 1965 г.

новки или агрегата, имеют ограниченную область приложения и, кроме того, не вскрывают сущности процессов, происходящих в установках. А это уже коренной недостаток такого направления исследований, не позволяющий эффективно использовать полученные результаты для создания новых установок. Так, наиболее перспективным направлением развития промышленных установок во многих отраслях техники является увеличение производительности единичного агрегата. Однако достижение этого за счет простого увеличения размера установки довольно быстро наталкивается на естественный предел. Более эффективным средством повышения производительности аппаратов является внесение изменений в протекающие в них процессы, например, за счет существенной их интенсификации. Но это принципиально невозможно сделать без предварительного их изучения, без знания закономерностей сложных комплексов физических явлений, определяющих эти процессы. Понимание сущности и установление физических процессов, протекающих в аппаратах, законов, которым эти процессы подчиняются, способствует развитию, во-первых, самой науки в части ее сложных и еще неизученных областей и, во-вторых, позволяет делать самые широкие выводы о работе многих других аппаратов, основанных на таких же принципах работы, и разрабатывать для них научно обоснованные расчеты.

К этому же физико-техническому направлению исследований нас приводит и анализ развития самих естественных наук.

В ряду философских вопросов современного естествознания все большее значение приобретает проблема взаимосвязи наук. Это проблема единства мира и особенностей различных его областей, а сообразно с этим — единого древа научного познания и качественного своеобразия различных отраслей науки. Наиболее яркие показатели этого процесса в современных условиях — дальнейшее проникновение в область микропроцессов ядра и новый этап экспериментального проникновения в область макропроцессов космического пространства.

Человечество всегда стремилось свести внутреннюю связь отдельных отраслей знания в единую научную систему. На основе великих открытий естествознания Ф. Энгельс раскрыл диалектическую связь между естественными науками, показав, что они проникают одна в другую и развиваются одна из другой — высшие из низших.

Таким образом, самым характерным в науке представляется одновременное развитие двух процессов, которые как бы прямо противоположны, но на самом деле взаимосвязаны и дополняют друг друга. Один состоит в дроблении и разветвлении наук, другой, напротив, — в стремлении объединить разобщенные науки в единую систему научного знания. В историческом разрезе на различных этапах научного процесса брало верх то одно, то другое направление. В наши дни имеет место их органическое единство. Это видно, например, из того, что вновь возникающие сегодня науки отнюдь не углубляют, как это было раньше, разобщенность наук между собой, но наоборот, ликвидируют их ранее существовавшую обособленность.

Если еще в середине прошлого столетия физика и химия были почти разъединены, то возникшие в конце прошлого века физическая химия и в нашем веке химическая физика соединили их, причем настолько тесно, что обе науки глубоко проникают одна в другую.

Относительно множества процессов в настоящее время даже невозможно сказать: физические они или химические, так как они и то и другое одновременно. Больше того, в настоящее время не существует и единой науки — физики. Широкая разветвленность современной физики,

благодаря ее тесной связи с другими отраслями естествознания и техникой, обусловили появление ряда пограничных наук. К огромному числу последних принадлежат и такие физико-технические науки, как теплофизика, электрофизика, радиофизика и другие.

Появление все новых и новых наук в пограничных областях является процессом, характерным и даже закономерным для современного развития естествознания.

К сожалению, положение это у нас далеко еще не всегда общепризнано и не всеми отчетливо представляется. Имеются еще случаи, когда эти пограничные области склонны рассматривать вне науки или, в лучшем случае, лишь в качестве прикладных наук. И это при том, что по здравому размышлению, казалось бы, любому исследователю должно быть совершенно ясно, что изучение сложных комплексов физических явлений, имеющих место в естественных природных и искусственных аппаратных условиях, возможно лишь на базе развития естественных наук в пограничных областях. При этом вместо искусственного разделения явления на физическое и химическое становится возможным рассматривать его во всей совокупности присущих ему явлений. Подчеркнем лишь то, что это вовсе не исключает, а, наоборот, подразумевает как раздельное изучение физических и химических процессов, так и их объединение и взаимовлияние.

Возьмем к примеру такие области науки, как тепло- и массообмен на движущихся потоках или горение газовых потоков, протекающее в различных гидродинамических и тепловых условиях, изучаемых в секторе теплофизики Института термофизики и электрофизики АН ЭССР. Для понимания физической сущности этих процессов наибольший интерес представляет вскрыть их механизм и установить для них количественные закономерности, в то время как прикладное их использование является лишь закономерным следствием, присущим всем наукам.

Сложная природа явлений горения получила отражение в широко распространенном кармановском определении науки о горении как «аэро-термо-химии», т. е. как о науке, в которой сочетаются законы аэро- и термодинамики, термодинамики и теплопередачи и, наконец, собственно химии (химической кинетики). Именно ввиду этой сложности первым шагом в построении количественной теории явлений горения должно стать создание физико-механической модели, в которой на основе экспериментальных данных определяется, как именно в этом явлении развитие химической реакции сочетается с переносом материи и тепла. В таком аспекте представляется задача специалистам, работающим в областях химической физики, физики, физической химии, и исследователям, занимающимся изучением процессов горения.

Количественная разработка различных схем, предложенных рядом исследователей, содержит много интересных мыслей и догадок, но не привела еще к результатам, допускающим их использование в инженерных расчетах.

Можно констатировать, что основным общим выводом из дискуссии о распространении турбулентного пламени, происходившей на последнем III совещании по теории горения в Москве в 1961 г., является заключение о недопустимости пренебрежения аэродинамической стороной явления, конкретной структурой газового потока. Этот тезис (об определяющей роли аэродинамики) с самого начала был положен в основу наших исследований по струйной теории факела. На последнем X Международном симпозиуме по горению также отмечалась определяющая роль аэродинамики на горение турбулентных диффузионных пламен.

Несмотря на всю практическую важность явления турбулентного горения и обширный опыт его применения, до сих пор все же отсутствуют не только количественная теория этого явления, но даже общепризнанные фундаментальные представления, которые могли бы составить основу для такой теории. Все сходится на том, что такое положение вызвано исключительной сложностью процессов горения вообще, а турбулентного — в особенности.

Эта точка зрения на процесс горения в турбулентном потоке как на процесс, определяющийся, в первую очередь, аэродинамикой, соответствовала нашим представлениям еще при начале теплофизических исследований в АН ЭССР в 1953 г. Поэтому было решено, что изучению собственно горения должны предшествовать систематические исследования аэродинамики, главным образом сложных струевых течений газа, развивающихся при различных взаимодействиях между собой и с основным потоком воздуха.

Аэродинамика турбулентных течений представляет собой наиболее сложную и наименее изученную сторону явлений. Теплообмен и горение в турбулентном потоке — еще более сложные процессы, так как в дополнение к неизученным процессам турбулентного массообмена здесь добавляются еще процессы теплообмена и горения.

Струевые течения привлекали внимание крупных ученых многих стран. Исследованием струй идеальной жидкости занимались Г. Гельмгольц (1868 г.), Г. Кирхгоф (1869 г.), С. Чаплыгин (1902 г.), Н. Жуковский и др.

Проблемами турбулентных струй занимались Л. Прандтль, Г. Тейлор, А. Милович, Т. Триппель, В. Цимм, В. Толмин, Г. Абрамович, Л. Лойцянский, Л. Вулис, Бай Ши-и и другие. Вопросам горения газа посвящены фундаментальные труды отечественных ученых: Н. Семенова, Я. Зельдовича, Д. Франк-Каменецкого, Л. Хитрина, Г. Кнорре, А. Предводителя, С. Щетинкова, Л. Вулиса, Б. Канторовича, К. Шелкина, А. Соколика и других. За последнее десятилетие число лиц и организаций, занимающихся комплексными исследованиями явлений аэродинамики и горения, неизмеримо увеличилось. В связи с этим принципиальным моментом являлся выбор области и направления исследований.

Избранная нами область исследования относится в основном к изучению процессов тепло- и массообмена и горения струй, развивающихся в поперечном потоке. При этом исследование струевых процессов является не самоцелью, а средством изучения сложных процессов, протекающих в различных установках, в первую очередь в тепловых. В этих процессах отражается влияние всей совокупности комплексов разнородных явлений. Природа этих зависимостей не ясна и поэтому невозможно предвидеть эффекты, которые произойдут при изменении ряда определяющих параметров. В связи с этим в ряде случаев без знания, например, аэродинамики взаимодействующих струевых течений вообще невозможно организовать нормальную работу технических аппаратов.

Представляется, что любое сколь угодно сложное движение и взаимодействие может быть составлено из более простых элементарных. Для этого необходимо предварительно провести систематические исследования таких струевых процессов. Были исследованы следующие системы струй: единичная струя в спутном потоке, система струй в спутном потоке, единичная струя в поперечном потоке, система струй в поперечном потоке, влияние начальной формы и начальных условий на развитие струи в спутном и встречном потоке, двухфазная (запыленная) струя в

неподвижном воздухе, неизотермическая струя с наличием подъемной силы, развивающаяся в поперечном потоке, параллельные соизмеримые струи, горение газов в свободном диффузионном факеле, некоторые случаи взаимодействия соизмеримых струй в ограниченном объеме, процессы массообмена между струями и потоком (спутным и поперечным), процессы перемешивания в основном ограниченном потоке при подаче в него различных систем струй, система радиальных струй в свободном поперечном потоке и ряд других струевых процессов. Результаты этих работ имели как научное, так и практическое прикладное значение.

Установленные в ходе этих исследований закономерности позволили глубже проникнуть в изучаемые процессы и не только понять их качественно, но и определить количественно. Так, установленные закономерности струи, развивающейся в поперечном потоке, позволяют рассчитать траекторию движения струи, втекающей в поток с любой скоростью под любым углом атаки, практически при любых плотностях струи и потока, определить границы струи, глубину ее проникновения в поток, длину участка, на котором струя полностью перемешивается с потоком или на котором скорость и концентрации составляют любые доли от своих первоначальных значений. Это позволяет не только понять физическую сущность сложных явлений в струях, но и рассчитать количественно ряд процессов, происходящих со струей, развивающейся в поперечном потоке. То же можно сказать и в отношении исследованных процессов массообмена в других струевых процессах.

Установленные закономерности изученных явлений, определяющиеся режимными и конструктивными параметрами, использовались нами и для ряда практических приложений. Так, например, закономерности струй, развивающихся в поперечном потоке, были положены в основу разработки научно обоснованных инженерных методов расчета рабочих процессов, протекающих в теплотехнических установках и их элементах:

- 1) бездымного сжигания твердых топлив в слоевых топках;
- 2) газовых горелок для сжигания любых горючих газов;
- 3) камер смешения газовых и парогазовых турбин;
- 4) подъема газов, выходящих из дымовых труб электростанций;
- 5) воздушных завес в отопительно-вентиляционной технике и др.

Практика применения их на различных объектах подтвердила правильность установленных закономерностей. Так, научно обоснованный инженерный метод расчета газовых и комбинированных горелок получил всеобщее признание и широкое применение в нашей стране. Рассчитанные и сконструированные по нему горелочные устройства обеспечивают полное сжигание газа. Применение их дает стране ежегодную экономию в сотни миллионов кубометров высококачественного природного газа.

Как известно, важнейшим элементом научной работы является подбор и подготовка специалистов-исследователей. За эти годы в этом направлении проводилась систематическая кропотливая работа. К сожалению, у нас в Эстонской ССР никто не готовит теплотехников — ни университет, ни политехнический институт, так же как ни одно высшее учебное заведение систематически не прививает своим выпускникам глубоких навыков и методов научной работы. Поэтому, после определения направления научных исследований, следующим по важности вопросом явилась подготовка научных работников. При этом основным и опреде-

ляющим моментом являлся вопрос, из кого готовить исследователей в области физико-технических наук — из физиков или техников.

Ответ на этот вопрос можно получить из рассмотрения порядка постановки и решения научных задач, заключающихся в следующем:

1. Изучаются и анализируются рабочие процессы наиболее перспективных тепловых установок (или любых других) с целью исследования их общей структуры и выделения из них составляющих простых явлений.

2. Изучаются в чистом виде методом физического моделирования на лабораторных установках (естественно-научный эксперимент) явления, которые составляют или могут составлять рабочие процессы реальных или вновь проектируемых установок.

3. Изучаются совокупности усложненных явлений в их взаимодействии как сложные комплексы (аналогия рабочего процесса).

4. Последующее изучение или проверка на реальной установке количественных закономерностей, установленных на лабораторных установках.

Существенно подчеркнуть, что поскольку задача науки — не только изучать природу, а главным образом преобразовывать ее, то в физическом эксперименте принципиально могут изучаться процессы, не существующие в природе, а искусственно созданные для практического применения или изучения.

Рассмотренный порядок выдвижения научных задач в области физико-технических наук показывает, что ведущей фигурой являются техники, которые не только могут выделять научные задачи из анализа работы существующих установок, но, зная путь развития данной области техники, могут выдвигать новые еще более перспективные научные задачи, решение которых позволит осуществить прогресс в развитии новой техники и технической мысли. Физикам выдвигать новые задачи, вытекающие из перспективного направления развития того или иного раздела техники, безусловно, труднее.

На методе исследования теплофизических процессов, протекающих в турбулентных струевых течениях при наличии массообмена или горения, необходимо остановиться специально. Нельзя не отметить, что некоторые наши ученые, видимо, по недоразумению, считают метод физического моделирования, основанный на применении теории подобия, недостаточно современным и полагают желательным заменить его, на их взгляд, более прогрессивным и перспективным аналитическим методом. В связи с этим необходимо отметить следующее.

В современной физике применяются два различных метода исследования, приводящие к количественным законам.

Существенная особенность первого метода — теоретической физики — заключается в том, что исследуемое явление рассматривается как объект приложения основных законов физики. Явление определяется с помощью системы дифференциальных уравнений, которые представляют собой общие законы, выраженные в форме, отвечающей специфическим его особенностям. Эта система уравнений содержит определения только наиболее принципиальных и основных сторон явления, общего для целого класса. Поэтому и общее решение должно представлять собой бесконечное множество возможных частных решений. Условия, позволяющие из всего множества явлений данного класса выделять единичное конкретное явление, называются условиями однозначности.

Совокупностью системы основных уравнений и условий однозначности явление определено вполне. Практическая же реализация тех зна-

ний, которые в ней содержатся, т. е. действительное определение частных значений переменных, в большинстве случаев связана с огромными, иногда непреодолимыми математическими трудностями. Однако нам бы хотелось обратить внимание на принципиальные трудности иного рода. Для турбулентных потоков замена в уравнениях пограничного слоя мгновенных величин суммой осредненных и пульсационных приводит к увеличению числа неизвестных величин, для определения которых требуются дополнительные уравнения. Кроме того, в большинстве случаев турбулентных течений не представляется возможным определить, а иногда даже сформулировать условия однозначности. Чаще всего нам совершенно неизвестен закон, по которому изменяются физические константы в струях на пути их движения или граничные условия во взаимодействующих струях, а следовательно неизвестны и условия однозначности. В этом случае строго решить задачу вообще нельзя. Решить ее аналитически можно лишь приближенно, внося множество упрощений. При этом не удастся составить достаточно определенного представления и о физическом смысле этих упрощений, т. е. не удастся выяснить полный объем тех качественных и количественных изменений, которые вносятся ими в математическое описание свойств явления, отвечающее первоначальному пониманию механизма. Поэтому во многих случаях полученными решениями все равно нельзя пользоваться без предварительной опытной проверки.

Существенная особенность второго метода — экспериментальной физики — заключается в опытном изучении данного конкретного явления. Полученные результаты отражают влияние всех его индивидуальных особенностей. Однако для того, чтобы полученные данные носили не частный, а общий характер, необходимо искать основания для их обобщения в изучении тех общих существенных сторон явления, которые определяются системой основных дифференциальных уравнений. Следовательно, задача заключается в нахождении такой формы обработки опытных данных, которая отвечает основным уравнениям. Эта задача в ее общем виде решается теорией подобия.

Таким образом, теория подобия представляет собой известный синтез методов теоретической и экспериментальной физики. Опираясь на данные непосредственного опыта, она приводит их к соотношениям, которые отвечают основным уравнениям и вследствие этого обладают большой общностью.

Для изучения сложных процессов, когда методы теоретической физики в чистом виде неприменимы, метод экспериментальной физики с обобщением опытных данных по теории подобия является принципиально единственным возможным научным методом исследования. Вообще гидродинамика турбулентных потоков, теплообмен и диффузионное горение превращаются в классические области приложения теории подобия.

Экспериментальный путь решения научных задач методами физического моделирования на лабораторных установках в равной мере требует привлечения техников и физиков.

В соответствии с этим, подготовка научных сотрудников — теплофизиков проводится из числа инженеров-энергетиков и физиков. За семилетку в секторе теплофизики были защищены четыре кандидатские диссертации и одна докторская. В ближайшие три года (1967—1969) сотрудники сектора представят и защитят пять кандидатских диссертаций.

К настоящему времени результаты как научных, так и практических работ доказали перспективность развивающегося направления иссле-

дований. Основной трудностью сейчас является отсутствие лабораторного корпуса. Как известно, проведение научных исследований на современном уровне, помимо правильных методов исследования и научной постановки работ, требует использования совершенного оборудования и приборов. В ближайшие годы необходимо построить лабораторный корпус и оснастить его соответствующим оборудованием. С этим нельзя медлить тем более, что в настоящее время струевые течения особенно перспективны в плазменных процессах, при непосредственном получении электроэнергии в МГД-генераторах и в ряде прогрессивных химических процессов с применением плазмы.

*Институт термофизики и электрофизики
Академии наук Эстонской ССР*

Поступила в редакцию
29/III 1966