

ПЕРВЫЕ РАБОТЫ ПО НЕИЗВЕДАНЫМ ПРОБЛЕМАМ ТЕРМОГИДРОДИНАМИКИ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

С. С. Кутателадзе

Как говорится, во время войны я был на войне. Обстоятельства сложились так, что меня хотели оставить на кадровой службе в Армии. Однако желание продолжать заниматься научной деятельностью было столь велико, что я обратился с просьбой о демобилизации к Верховному Главнокомандующему. По-видимому, мои доводы были сочтены уважительными. В августе 1945 г. я был демобилизован и направлен опять на работу в ЦКТИ.

Директором Института в то время был один из выдающихся ученых и конструкторов в области турбостроения, ныне академик АН УССР, Герой Социалистического Труда Л. А. Шубенко-Шубин. С ним мы были знакомы еще до войны по совместным работам на Ленинградском Кировском заводе, быстро нашли общий язык и я получил ту комнату на Кленовой улице 2, в которой до войны работала наша комсомольская исследовательская группа, основными участниками которой, кроме меня, были Ляля Моложен, Саша Коровина и Володя Зысин.

Традиционное помещение Физико-технического отдела ЦКТИ было разорено и сильно повреждено. Начиналось его восстановление и заведовавший Отделом в то время профессор В. С. Жуковский, человек образованный и добрейший, мало чем мог помочь в воссоздании полностью исчезнувшего по тому времени уникального довоенного оборудования и приборов.

Первыми послевоенными моими сотрудниками стали тоже демобилизованные из Армии инженер В.М. Боришанский и механик Н.М. Ильин. Несколько позднее пришел также из Армии Ф.П. Минченко, делавший у меня до войны дипломную работу. В.М. Боришанский, впоследствии ставший известным профессором, потом многие годы руководил моей лабораторией в Отделе атомной энергетики ЦКТИ, а Н.М. Ильин поехал со мной в Сибирь, где принимал активное участие в создании Института теплофизики, будучи его первым главным механиком.

Л.М. Зысина-Моложен защитила в 1944 г. кандидатскую диссертацию на основе исследований, проводившихся в нашей довоенной группе по механизму пузырькового кипения. Это были первые в стране и одни из первых в мире такого рода эксперименты. Принципиальным их результатом было обнаружение отчетливой зависимости скорости роста паровых пузырей U_n на центре парообразования от давления так, что $U_n \sim P^{-n}$, где $n \approx 1$. Таким образом была показана некорректность вывода М. Якоба о постоянстве величины U_n , что имело существенное значение для развития теории кипения. Эти результаты были обсуждены и опубликованы нами совместно в 1950 г.

Л.М. Зысина-Моложен и В.А. Зысин также стали крупными профессорами, одна специалистом в термогазодинамике турбомашин, второй в общей термодинамике и термодинамике гетерогенных потоков. С Ларисой Михайловной мы стали снова работать вместе, когда я в 1954 г. принял руководство Физико-техническим отделом ЦКТИ.

После моего переезда в Сибирь она стала заведовать созданной нами лабораторией теплофизики этого Отдела.

Не помню точно когда, но вскоре после демобилизации, я был приглашен в одну из групп учреждения, именованного Лабораторией измерительных приборов Академии наук СССР — ныне всемирно известного Института атомной энергии им. И.В.Курчатова. Там я встретился с академиком Г. Н. Флеровым и рядом других выдающихся ученых и инженеров, которые объяснили мне важность знания законов теплообмена при кипении для проектирования ядерных реакторов. Те наши работы, которые до войны некоторые мои старшие коллеги по ЦКТИ называли абстрактными и бесполезными, оказались в определенном смысле на острие термогидродинамических проблем реакторостроения. Наиболее существенным с практической точки зрения и сложным в теоретическом и экспериментальном плане здесь было выяснение основных закономерностей перехода от пузырькового режима кипения, обеспечивающего высокий теплосъем, к пленочному кипению — аварийному вследствие резкого снижения интенсивности теплообмена при отделении жидкости паровым слоем от тепловыделяющего элемента.

Примерно в это же время в Москве возобновилось наше довоенное знакомство с М.А. Стыриковичем, который продолжал активно заниматься внутрикотельными процессами и, в соответствии с требованиями времени, аналогичными явлениями в водоохлаждаемых ядерных реакторах. Побывал я также у академика М.В. Кирпичева, создавшего крупный отдел теплофизического профиля в ЭНИНе. Михаил Викторович пригласил меня к себе, подарил несколько редких оттисков первых публикаций созданного им и профессором А.А. Гухманом Теплотехнического отдела Ленинградской государственной физико-технической лаборатории. Именно этот отдел стал в 1927 г. одной из двух главных составляющих созданного тогда Ленинградского областного теплотехнического института — впоследствии ЦКТИ.

В эту же первую нашу послевоенную встречу Михаил Викторович предложил мне остаться в Москве и работать вместе с ним по моей тематике в области теплообмена при изменении агрегатного состояния вещества. Однако мой ленинградский дух пересилил и я не принял этого лестного предложения.

В 1951 г. он представил к публикации в Известиях АН СССР одну

из моих первых работ по гидродинамической теории кризисов кипения. В 1946–47 гг. мы создали несколько экспериментальных установок, по тем временам оригинальных и достаточно масштабных. Имелась возможность наблюдать визуально и фиксировать инструментально возникновение пленочного кипения на графитовых стержнях и пластинах, а также на металлических трубках, в условиях свободной и вынужденной циркуляции. Опыты проводились как в относительно больших объемах жидкости, так и в щелевых каналах. Последние в то время были основным объектом изучения в тепломеханических лабораториях различных ядерных исследовательских центров мира.

Главным результатом этих работ было создание основ гидродинамической теории кризисов кипения и вывод первых теоретических структур зависимости критического теплового потока от физических свойств рабочего тела, дефекта среднемассовой температуры жидкости относительно температуры насыщения, а также от скорости вынужденного течения жидкости (1948–1950 гг.).

Две основные формулы стали в настоящее время общепринятыми и вошли во все учебные курсы теплопередачи: критический тепловой поток в насыщенной, свободноциркулирующей, невязкой и несжимаемых жидкости и паре,

$$q_{kp1} = \text{const } r \sqrt{\rho''} \sqrt[4]{\sigma g(\rho' - \rho'')},$$

относительное влияние недогрева основной массы жидкости до температуры насыщения v

$$\bar{q}_{kp} \approx 1 + \text{const} \frac{c'v}{r} \left(\frac{\rho'}{\rho''} \right)^n,$$

где $n \approx 0,8$.

Однако в сороковых и пятидесятых годах эта модель и вытекающие из нее следствия были настолько неожиданными, что встретили активное неприятие и противодействие со стороны некоторых достаточно известных исследователей. Только после 1959 г., когда Трайбус, Зубер и Чанг в ряде статей дали некоторые дополнительные интерпретации нашей теории, она получила полное признание.

Интересной ветвью работ по кипению была постановка по моему предложению систематического исследования сфероидального состояния жидкости на горячих поверхностях. Причем эти эксперименты, составившие потом основу кандидатской и существенной части докторской диссертаций В.М. Боришанского, проводились как с каплями, так и впервые с крупными объемами жидкости (то, что мы называли плоскими и пузырчатými сфероидами). При этом возникли интересные контакты с группой академика

П.А. Ребиндера, который занимался этими вопросами в связи с физико-химическими процессами при жидкостном охлаждении режущего инструмента.

Могу сказать, что интерес к этим объектам в настоящее время также существует, но уже на другом исследовательском и прикладном уровнях.

В те же первые послевоенные годы активно началось изучение жидкометаллических теплоносителей, связанное с идеей реакторов на быстрых нейтронах. По предложению действительного члена АН УССР А.И. Лейпунского, зачинателя этого направления ядерной энергетики, я со своими товарищами начал создавать в ЦКТИ комплекс лабораторных установок, позволявший изучать гидродинамику, теплообмен, эрозию и интеркристаллическую коррозию при течении тяжелых (висмут, свинец, их сплавы) и легких (натрий, калий, их эвтектика) металлов в каналах из различных конструкционных материалов. Затем, когда это направление стало разрабатываться, проблемы механической и коррозионной прочности материалов в жидкометаллических теплоносителях были переданы и развиты в Отделе металлов ЦКТИ.

Рамки лаборатории на Кленовой 2 стали нам явно малы и мы переехали в здание на Лесном проспекте, войдя в Отдел атомной энергетики (вернее, тогда была группа из нескольких фактически автономных лабораторий, работающих над разными теплотехническими и теплофизическими объектами этой новой отрасли науки и техники).

Был накоплен значительный технологический материал по жидкометаллическим теплоносителям, а главное, выяснены особенности их теплового взаимодействия с каналами различной конфигурации. Эти результаты значительно перекрывали то, что делалось тогда в Энергетическом институте им. Г.М. Кржижановского и коррелировались с технологическими исследованиями, которые велись в Физико-энергетическом институте под руководством В.И. Субботина (ныне члена-корреспондента АН СССР).

Хорошим критерием качества этих исследований явилось то, что доклад от СССР о теплообмене в жидких металлах на II-й Женевской конференции по мирному использованию атомной энергии был представлен авторским коллективом от ЦКТИ (С.С. Кутателадзе, В.М. Боришанский) и ФЭИ (В.И. Субботин, П.Л. Кириллов). В том же году, по поручению Комитета по атомной энергии, мною совместно с В.М. Боришанским, И.И. Новиковым и О.С.Федынским была опубликована первая отечественная монография на эту тему. Уже в следующем 1959 г. эта монография была переиздана на английском языке Атомной Комиссией США. В том же году, там же был издан и перевод моей монографии 1952 г. «Теплопередача при конденсации и кипении» (ее первое издание, менее полное, вышло в 1949 г. и частично

было подготовлено мною в Мурманске в последний год войны).

В 1946–1950 гг. в нашей группе был проведен ряд работ и в некоторых других направлениях. Были сформулированы первые аналитические модели гидродинамики кольцевого режима течения газо(паро)жидкостных потоков в вертикальных трубках (аналогичная работа была сделана одновременно и независимо также А.А. Армандом в ВТИ, который поставил и блестящее экспериментальное исследование), сформулированы основные числа подобия и возможные структурные связи между ними для динамики газожидкостных систем. Думаю, что эти результаты были существенны даже в то время для работы над нормами расчета внутрикотловой гидродинамики, проводившейся в Котельном отделе ЦКТИ. Д.Ф. Петерсоном, О.М. Балдиной и др. Впоследствии эти исследования легли в основу первой в мировой литературе монографии по динамике газожидкостных систем, написанной совместно с академиком М.А. Стыриковичем (1958 г.).

В 1948–1950 гг. на циркуляционном контуре нашей группы в Физико-техническом отделе Л. С. Шумская, будучи аспиранткой члена-корреспондента И. Н. Вознесенского, провела эксперименты и обобщающие вычисления, позволившие сформулировать эффективные формулы и графики для инженерных расчетов динамики барабанных паровых котлов. Эти результаты были опубликованы как в отечественной литературе, так и за рубежом (США, Англия). Насколько я могу судить, они и в настоящее время имеют существенное методологическое и прикладное значение.

Работы по динамике парожидкостных потоков мы активно обсуждали с профессором В.Н. Шретером крупным специалистом в области котлостроения, обладавшим удивительной инженерной интуицией и замечательной добротой и сочувствием к людям. Владимир Николаевич активно содействовал нашей довоенной комсомольской группе, поэтому особенно приятно было продолжение этих очень теплых и творческих отношений в первые послевоенные годы.

К сожалению, его жизнь преждевременно прервалась в 1950 г.

В 1947 г. мой старший друг, старый большевик Р.В. Цукерман начал заниматься историей техники, усиленно работал под руководством действительного члена АН УССР В. В. Данилевского в архивах и обнаружил ряд интересных документов по истории отечественной теплотехники XVIII–XIX веков. Он как-то сумел вовлечь в эти, вообще говоря, очень интересные дела и меня. Мы вместе ходили в книгохранилища, обсуждали обнаруженные документы и прочитанные книги и рукописи того времени. Надо сказать, что конец сороковых – начало пятидесятых годов были временем непростым и в отношении таких исторических изысканий существовали различные подходы и оценки. Первая наша совместная статья была опубликована в 1948 г.

и несколько статей (в том числе совместно с профессором В.Н. Дешниным) еще в 1949–52 гг.

Более подробно эти материалы были изложены в двух наших небольших монографиях (1949, 1951). Думаю, что факты, в них приведенные, выдержали испытание временем, а их интерпретация в основном была достаточно объективной.

Так же как годы первых пятилеток и годы войны, последовавшие за последней, первые годы восстановления нашей Советской Отчизны были наполнены необычайным патриотическим подъемом, огромной жаждой работы и творческой деятельности, исключительной интенсивностью труда, не считаясь со временем, материальными и организационными трудностями. Все это было и в нашем небольшом коллективе бывших фронтовиков, которому посчастливилось тогда включиться в разработку, практически почти с нуля, нескольких новых принципиальных проблем термогидродинамики и энергетики.