

15. Федоренко И. В. Ракетостроители Украины / Ирина Владимировна Федоренко. – Днепропетровск : Издательство «Инновация», 2008. – 408 с. 16. Федоренко I. B. Історія становлення та розвитку науково-технічної школи М. Ф. Герасюти „Теорія польоту ракетно-космічної техніки” (друга половина ХХ століття): автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. іст. наук : спец. 07.00.07 – Історія науки і техніки / I. B. Федоренко. – К., 2009. – 20 с. 17. Науков. школи НТУ „ХПІ”. 1885–2010. Історія розвитку” / О. В. Акімов, Є. С. Александров, Д. В. Бреславський та ін. – Харків : НТУ „ХПІ”, 2010. – 695 с.

Надійшла до редколегії 20.04.10

УДК 50(091)621

Э. Г. БРАТУГА, д-р техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»
О. В. КРУГЛЯКОВА, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»

ТЕРМОГАЗОДИНАМИКА ДВУХФАЗНЫХ ПОТОКОВ КАК НАУЧНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ В ЭВОЛЮЦИИ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Рассмотрены основные аспекты научно-технических проблем, разрешаемых в России и Украине в процессе становления ядерной энергетики при участии ведущих турбостроительных заводов, научно-исследовательских институтов и высших учебных заведений этих стран.

Розглянуто основні аспекти науково-технічних проблем, що вирішуються у Росії та Україні в процесі становлення ядерної енергетики при участі ведучих турбобудівних заводів, науково-дослідницьких інститутів і вищих навчальних закладів цих країн.

The basic aspects of the scientific and technical problems resolved in Russia and Ukraine during development of nuclear power at participation of leading turbine factories, scientific research institutes and higher educational institutions of these countries are considered.

Введение

С тех пор, как в VII веке китаец Сунь Сямю, смешав селитру, серу и опилки локустового дерева, получил порох, усилия алхимиков, изобретателей и ученых были сосредоточены на поиске способа генерирования большого количества энергии из малого по массе и объему вещества.

Подобно пороху, но 13 столетий спустя (и это еще один пример поразительной стабильности противоречия между нравственностью и интеллектом) – ядерная энергия стала предметом острого интереса ведущих физиков мира, прежде всего, как энергия оружия массового поражения.

Еще в 1937 г. Резерфорд, один из известнейших физиков планеты, был убежден, что атомную энергию никогда не удастся использовать практически. Однако уже в 1940 г., как отмечено в [1], сотрудниками Украинского физико-технического института Ф. Ланге, В. Шпинель и В. Масловым было получено авторское свидетельство на создание атомной бомбы.

Не вдаваясь в достаточно известные подробности истории создания этого оружия и его применения в августе 1945 г. при бомбардировке городов Хиросимы и Нагасаки, скажем, что создание первых ядерных реакторов для обогащения урана было обусловлено лишь милитаристскими амбициями.

Тем не менее, экспериментально-теоретические исследования, щедро финансируемые военными ведомствами, явились основой для создания ядерных реакторов, как энергетической основы атомных электрических станций.

Первый проект ядерного реактора разработал в 1939 г. французский ученый Фредерик Жолио-Кюри (1900–1958). Сейчас трудно оценить эту разработку с этической точки зрения. Хотелось бы думать, что в последующем председатель Всемирного Совета Мира, лауреат премии „За укрепление мира между народами” (1951) – Жолио-Кюри вряд ли в 1939 г. ориентировал свой интеллект на, мягко говоря, немирное развитие собственных исследований. Об этом трудно судить еще и по той причине, что вскоре Францию оккупировали фашисты, и проект реактора не был реализован.

Цепная реакция деления урана впервые была осуществлена в 1942 г. в США в реакторе, который группа исследователей во главе с итальянским ученым Энрико Ферми запустила в Чикагском университете. Реактор имел мощность 20 кВт и, что существенно с точки зрения дальнейшей эволюции этого объекта, он работал без внешнего охлаждения.

Первый ядерный реактор в Европе был построен под руководством академика И. В. Курчатова (1902–1960) и запущен в 1946 г. Можно считать известным фактом [2–5], что ориентация исследований и Э.Фреми, и И. В. Курчатова, увенчавшихся созданием ядерной и термоядерной (1953) бомб, носила совершенно определенный характер, обусловленный сущностью объекта исследований.

Как известно, первая в мире атомная электростанция, давшая ток в электрическую сеть, вошла в строй в 1954 г. в г. Обнинске (Московская область). С этого времени атомная энергетика развивалась столь стремительно, что в 1975 г. в эксплуатации находилось 132 АЭС в разных странах мира и еще 280 строилось [6]. По данным МАГАТЭ на февраль 2009 года мировая энергетика располагала 436 действующими и 44 строящимися АЭС.

Учитывая гуманитарный характер журнала, а соответственно, и характер образования ряда его читателей, напомним, что тепловая электростанция – это огромное количество угля (или природного газа), сжигаемого в мощных парогенераторах, паровые турбины, электрогенераторы и множество достаточно сложного вспомогательного оборудования. И если парогенератор заменить ядерным реактором, то тепловая станция превращается в атомную, и в принципе технологический процесс изменяется только в первой фазе – там, где он связан с характером топлива. Далее нагретая вода также превращается в пар, который приводит в действие турбину, вращающую электрогенератор. Таков сегодня общий цикл превращения теплоты, выделенной при окислении органического топлива или в процессе цепной реакции деления ядер, к примеру, атомов урана-235.

Основная часть

Дальнейшее содержание нашей статьи фактически обусловлено одним из многих классификационных признаков ядерных реакторов. Речь идет о виде теплоносителя, т.е. вещества, воспринимающего энергию от тепловыде-

ляющих элементов (ТВЭЛов) ядерного реактора и передающего эту энергию воде для генерирования пара, используемого в турбине.

История развития атомной энергетики сложилась так, что строительство АЭС в Советском Союзе базировалось на так называемых водоводяных реакторах типа ВВЭР (водоводяной энергетический реактор) и кипящих канальных уран-графитовых реакторах типа РБМК (реактор большой мощности кипящий), в которых теплоносителем, отводящим энергию от ТВЭЛов, являлась вода [7]. Атомные электростанции с реакторами типа ВВЭР получили распространение во многих странах мира. Использование обычной воды в качестве теплоносителя и замедлителя нейтронов значительно упрощает технологическую схему активной зоны реактора. Впервые реактор такого типа был установлен на Нововоронежской АЭС в сентябре 1964 г. и имел мощность 210 МВт.

Не вдаваясь в теплофизические детали процесса отвода теплоты от ТВЭЛов, отметим, что уникальные свойства воды (описанные одним из авторов в [8, 9]) оказались применительно к работе ВВЭР термодинамически ограниченными. Речь идет о низкой, так называемой критической температуре воды, когда за пределами $374,15^{\circ}\text{C}$ она мгновенно превращается в перегретый пар, свойства которого как среды, отводящей теплоту, ухудшаются в сотни раз.

Именно это обусловило для реактора указанного типа низкие параметры генерируемого пара, свойства которого близки к свойствам насыщенного или весьма слабо перегретого пара. Расширение такого пара в турбине сопровождалось явлениями, породившими в энергетике такое новое научное направление как *термогазодинамика двухфазных потоков*.

К настоящему времени авторам статьи не известны работы, в которых в историческом плане прослеживалось бы развитие указанного направления и ряда его составляющих, в каждом из которых приобрели известность и значимость, новые научно-технические решения и новые имена ученых и инженеров.

Для понимания „проблемы влажнопаровых турбин” (именно так она была обозначена в самом начале семидесятих годов прошлого столетия) следует в самой простой и доступной форме сказать о том, что представляет собой влажный насыщенный пар, и к каким последствиям приводит его расширение в проточной части турбины, где внутренняя энергия пара превращается в механическую энергию вращения ротора.

Если следовать общепринятой терминологии, то влажный насыщенный пар – это смесь сухого насыщенного пара (газообразная фаза) и капель воды (жидкая фаза). Если к сухому насыщенному пару (СНП) подводить теплоту – он становится перегретым и при том же давлении его температура станет выше температуры насыщения. Если от СНП отводится теплота, то он частично начинает конденсироваться, превращаясь в жидкую фазу в виде капель, пленок или отдельных струек. В рассматриваемой нами ретроспективе проблемы термогазодинамики двухфазных сред именно это свойство – переход паровой фазы в жидкую – является определяющим.

При течении влажного насыщенного пара в лопаточном аппарате турбины трансформация теплоты пара в механическую энергию вращения ротора всегда сопровождается так называемым фазовым переходом, когда в направляющих и рабочих каналах возникает и создает проблемы жидкая фаза – в основном в виде капель и пленок. Именно эта термодинамическая особенность истечения влажного насыщенного пара в проточной части паровой турбины в существенной мере определила формирование нового направления в энергетике – атомного турбиностроения.

Постепенное увеличение мощности ядерных реакторов потребовало создания более мощных турбогенераторных блоков. Этот традиционный сегмент энергомашиностроения заметно отставал от стремительного роста возможностей реакторов по росту единичной мощности машин. Как отмечалось [10], к такому взлету атомной энергетики не был готов не только «Турбоатом», но и Советский Госплан.

Почти полтора десятилетия после пуска первой АЭС обходились без специального производства „атомных” турбин, „подгоняя” обычные машины под параметры, необходимые ядерным энергоблокам (с более низкими температурами и более высокой влажностью пара). Но к концу 60-х годов отставание уже бросалось в глаза. Традиционное машиностроение оказалось более инерционным, чем требования новой энергетики.

Постепенно этот разрыв был преодолен. В течение 60–70-х годов огромные средства уже вкладывались не только в производство реакторов – „тысячников” (Ижорский завод и Атоммаш), но и в изготовление турбин (Харьковский турбогенераторный завод (ХТГЗ) и Ленинградский металлический завод (ЛМЗ)).

Первые испытания турбин, предназначенных для АЭС, прошли на ХТГЗ еще в 1956 году. Результатом напряженной работы ученых и конструкторов стало то, что уже через 10 лет была установлена первая турбина АК-75-30 мощностью 75 тыс. кВт на повышенные параметры пара.

В конце 60-х годов остро стали вопросы о создании в стране специальной отрасли и о размещении производственного центра атомного турбиностроения. Выбор лежал между ХТГЗ и ЛМЗ. Постановлением ЦК КПСС и Совмина СССР от 16.09.1971 г. ХТГЗ (он в 1980 году стал официально именоваться Производственным объединением атомного турбостроения „Харьковский турбинный завод имени С. М. Кирова”) становится головным предприятием по проектированию и изготовлению мощных паровых турбин для атомных электростанций.

Параллельно с развитием производственной базы, ориентированной на выпуск оборудования для АЭС, формировались соответствующие научно-исследовательские подразделения. Непосредственно при ХТГЗ им. С. М. Кирова был создан опытно-исследовательский отдел (начальник отдела Буряк В. И.), в котором сформировалась группа исследователей, занятых влажно-паровой тематикой. Это И. А. Лавров, Ю. Ф. Косяк (в последующем – генеральный конструктор паровых турбин), Т. М. Зильбер, М. Б. Явельский, В. П. Орловский.

Этой группой были созданы первые в Советском Союзе экспериментальные влажно-паровые турбины ЭПТ-1 и ЭПТ-2, где с использованием современных (на тот период) средств диагностики выполнялись принципиально новые исследовательские работы лопаточного аппарата в условиях повышенной влажности пара.

Потребовалось более 18-ти лет, чтобы в период в 1962 по 1980 годы на ХТГЗ было создано так называемое лопаточное производство, отвечающее требованиям атомного турбостроения.

В Москве на базе Московского отделения ЦКТИ им. И.И.Ползунова приказом министра энергетического машиностроения СССР от 5.12.1977 г. был создан Всесоюзный научно-исследовательский институт Атомного машиностроения, основной направленностью которого был широкий спектр теплофизического исследования процессов в реакторах, паровых турбинах, а также в разработке специальных средств технической диагностики.

В Центральном котлотурбинном институте имени И. И. Ползунова (ЦКТИ) крупный отдел был ориентирован на теоретические исследования, связанные с неравновесными термодинамическими процессами переохлажденного насыщенного пара и так называемой спонтанной его конденсацией при работе в турбинной ступени. Оригинальные исследования в этой области принадлежали Ю. Я. Качуринеру, Ю. В. Нахману, И. П. Фаддееву, С. М. Базарову.

В семидесятые годы, а, пожалуй, и в дальнейшем, основы научного сопровождения создания и совершенствования всего комплекта технических решений, связанных с атомной энергетикой, взяли на себя несколько высших учебных заведений, работающих в тесном творческом содружестве со специализированными исследовательскими отделами ХТГЗ и ЛМЗ.

Среди этих вузов необходимо отметить Московский энергетический институт (МЭИ), в частности, его кафедру турбиностроения, возглавляемую в то время профессором А. В. Щегляевым. Большой вклад в теорию паровых турбин был внесен профессорами этой кафедры: М. Е. Дейчем, Г. А. Салтановым, О. А. Поваровым, В. В. Пряхиным, Г. В. Циклаури, Б. М. Трояновским и Г. А. Филиповым (с 1977 г. ставшим директором Всесоюзного научно-исследовательского института атомного машиностроения).

Основой содержания исследования этих ученых явилось экспериментально-теоретическое изучение термо-газодинамических процессов течения и сепарации двухфазных сред и создание инженерной методики расчета проточной части паровых турбин.

Начиная с 1954 года по заданию ХТГЗ им. С. М. Кирова к исследованию течения влажного пара в направляющих лопаточных решетках турбин подключилась группа молодых специалистов кафедры теплотехники Харьковского политехнического института (ХПИ). Инициатива проведения этих работ принадлежала заведующему кафедрой Г. И. Павловскому, руководителем группы был Э. Г. Братута. Несколько позже в группу вошли Л. А. Заночкин, А. Ю. Ивановский, С. П. Шатилов и Н. Я. Есипенко.

По тем временам этой группой была создана на территории испытательного стенда ХТГЗ уникальная экспериментальная установка. Здесь впервые в практике отечественного исследования удалось установить закономерности изменения расходных и энергетических характеристик течения влажного пара, являющихся основополагающими при расчете проточной части турбины в области двухфазного течения. Оригинальность этого стенда состояла в том, что энергетические характеристики сопловых решеток определялись по измерению реактивного усилия, создаваемого потоком влажного пара. Это обеспечило гораздо более высокую точность определения искомых величин по сравнению с результатами традиционных так называемых зондовых измерений.

Не вдаваясь в детали, следует сказать, что наиболее ответственным элементом проточной части влажнопаровой турбины всегда являлась так называемая последняя ступень, точнее, рабочее колесо этой ступени. Огромные массовые расходы пара (более 100 кг/с) при весьма низкой его плотности приводили к тому, что высота рабочей лопатки в ряде случаев была более полутора метров. Поэтому обеспечение высокой экономичности облопачивания в сочетании с необходимой прочностью (когда центробежная сила, стремящаяся вырвать рабочую лопатку из ступицы диска, составляла более 50 тонн) – эта задача представляла собой серьезную многофакторную проблему. Именно ее по заданию ХТГЗ решала группа ученых кафедры турбиностроения ХПИ, возглавляемая в то время профессором Я. И. Шнее. Большой вклад в решение этой проблемы внесли профессора М. Е. Левина, В. Н. Пономарев, Г. А. Соколовский, А. В. Гаркуша, А. В. Бойко (в настоящее время – заведующий кафедрой турбиностроения НТУ „ХПИ”).

Надежность работы влажнопаровой турбины неразрывно связана с вопросами эрозионного износа ее лопаточного аппарата. Суть вопроса заключалась в том, что капли, возникающие при расширении пара в турбине, сталкиваясь с вращающейся поверхностью рабочих лопаток (при относительной скорости взаимодействия порядка нескольких сотен метров в секунду) вызывают механическое разрушение этой поверхности. Возникающий эрозионный износ опасен не только в связи с ухудшением экономичности проточной части, но также с точки зрения снижения уровня безопасности ее работы. Исследования, связанные с эрозионным износом, включают в себя целый комплекс проблем, таких как изучение физических явлений, связанных с различными условиями взаимодействия капель с твердой преградой; анализ свойств эрозионной среды при различных режимах эксплуатации турбины; разработка методов расчета эрозии рабочих лопаток турбины; разработка способов противоэрозионной защиты.

Системно проблема эрозионного износа различных элементов энергетических и транспортных систем изучалась в Московском авиационном институте (МАИ) под руководством профессора Р. Г. Перельмана, который известен своими разработками в области эрозионной прочности конструктивных материалов. Подобные исследования выполнялись в ЛПИ под руководством И. П. Фаддеева, а также в МЭИ под руководством О. А. Поварова, где работы непосредственно концентрировались на

особенностях работы турбинных ступеней во влажном паре. Кроме того, в ЦКТИ им. Ползунова под руководством Р. М. Яблоника проводились исследования закономерностей взаимодействия капель с твердой преградой.

Начиная с конца 70-х годов, к проблеме исследования эрозии турбинного облопачивания подключается группа ученых Института проблем машиностроения НАН Украины, возглавляемая ныне член-корреспондентом НАН Украины А. Л. Шубенко, в состав которой входил теперь уже доктор технических наук А. Л. Ковальский. Группа работала в тесном взаимодействии с профессором кафедры турбиностроения ЛПИ И. П. Фаддеевым. В итоге были получены весьма обширные экспериментально-теоретические результаты, вбирающие в себя разнохарактерные аспекты проблемы эрозии – от кинематики движения дисперсной среды во влажном паре и влияния этой среды на экономичность и надежность турбины до вопросов механического взаимодействия капель с поверхностью металла и изменением его поверхностной структуры, обусловленной этим взаимодействием.

Примерно в этот же период проблема защиты турбинного облопачивания от эрозионного износа стала предметом исследования кафедры металловедения ХПИ, возглавляемой в то время профессором В. В. Гавранко. Под его руководством и непосредственным участием был разработан ряд комплексных технологических процессов по упрочнению рабочих лопаток турбин. Следует отметить, что разработки этой кафедры позволили не только предложить эффективные средства защиты, но и реализовать их технически на специально разработанной установке в условиях кафедральной лаборатории. На кафедру металловедения привозили партию рабочих колес, они подвергались облопачиванию и шли на сборку очередной турбины АЭС. Авторам статьи неизвестны примеры столь непосредственного взаимодействия науки и производства в области турбиностроения.

Проблема эрозии турбинного облопачивания вызвала необходимость в разработке специальных средств диагностики капельных потоков. Речь шла об аппаратуре, позволяющей проводить измерения размеров капель, появляющихся в процессе конденсации пара. Актуальность этой задачи была обусловлена тем, что размер капли и вектор ее скорости, по сути, были основными факторами, определяющими интенсивность разрушения поверхности лопатки.

Значительный вклад в решение этой проблемы был внесен в 70-е годы сотрудниками ЦКТИ им. И. И. Ползунова С. М. Базаровым, Ю. В. Нахманом, К. С. Шифриным и В. И. Голиковым, а также московскими учеными профессорами Б. И. Леончиком и В. П. Маякиным.

В ХПИ проблемы измерения размеров капель были посвящены работы, проводившейся на кафедре экспериментальной и теоретической физики (доценты А. С. Лагунов и А. П. Байвель) в сотрудничестве с учеными ЦКТИ им. И. И. Ползунова.

Несколько позже (начиная с 1975 года) на кафедре теплотехники ХПИ получил теоретическое обоснование и аппаратурное оформление так называемый счетно-импульсный метод измерения капель. Под руководством

Э. Г. Братуты [11] эти работы выполнялись при активном творческом участии А. Р. Переселкова, Л. А. Заночкина и В. М. Воробьева.

Еще одной важной задачей диагностики влажного пара, определяющей возможность количественной оценки многих характеристик течения двухфазной среды, являлась задача измерения влажности пара – фактически, концентрации жидкой фазы в паре. Не станем перечислять имена ученых и организаций, в которых проходила эта работа, так как все они уже были упомянуты ранее в соответствующих аспектах, связанных с общей теорией, экспериментом и диагностикой процессов во влажнопаровых турбинах АЭС.

Выводы

1. В настоящей статье впервые в историческом контексте представлены основные научные проблемы термогазодинамики влажного пара как основы создания и совершенствования мощных современных турбин, предназначенных для работы в условиях атомных электрических станций.

2. Показано, что обеспечение экономичности и надежности проточной части турбин АЭС явилась результатом активного творческого взаимодействия как отдельных научных школ России и Украины, как и сотрудничестве указанных школ с ведущими турбостроительными заводами этих стран.

3. Дальнейшее более детальное исследование исторических аспектов формирования научно-технических решений в области совершенствования влажнопаровых турбин АЭС должно быть продолжено в следующих направлениях:

- взаимодействие научных школ Украины и России;
- предыстория теории двухфазных течений в проточной части турбин, основанная на достижениях из других областей науки и техники;
- ранние зарубежные исследования неравновесных фазовых переходов как основа современных научных исследований и инженерных решений;
- развитие теории истечения двухфазных сред и процессов эрозии турбинного облопачивания на основе результатов, полученных при экспериментально-теоретическом исследовании камер сгорания ракетных двигателей.

Список литературы: 1. *Бесов Л. М.* История науки і техніки / Л. М. Бесов. – Харків : НТУ „ХПР”, 2005. – 376 с. 2. *Александров А. Д.* Проблемы науки и позиция ученого / А. Д. Александров. – Л., 1988. 3. *Астащенко П. Т.* Академик И. В. Курчатov / П. Т. Астащенко. – М., 1967. 4. *Грабовский М. П.* Атомный аврал / М. П. Грабовский // История науки и техники. – 2002. – №9. 5. *Петросьянц А. М.* Атом не должен служить войне / А. М. Петросьянц. – М., 1986. 6. *Тельдешин Ю.* Мир ищет энергию / Ю. Тельдешин, Ю. Лесны; пер. со словац. – М.: Мир, 1981. – 439 с. 7. *Жимерин Д. Г.* Проблемы развития энергетики / Д. Г. Жимерин. – М.: Энергия, 1978. – 288 с. 8. *Братута Э. Г.* Природное чудо Вода: и Жизнь, и Сила, и Беда. Книга 1. Жизнь / Э. Г. Братута. – Харьков: НТУ „ХПИ”, 2003. – 240 с. 9. *Братута Э. Г.* Природное чудо Вода: и Жизнь, и Сила, и Беда. Книга 2. Сила / Э. Г. Братута. – Харьков: НТУ „ХПИ”, 2005. – 223 с. 10. Турбоатому-75. История, достижения, перспективы / Редкол.: В. Г. Субботин, А. А. Бугаец, Е. В. Левченко и др. – Харьков: Золотые страницы, 2009. – 200 с. 11. *Братута Э. Г.* Диагностика капельных потоков при внешних воздействиях / Э. Г. Братута. – Харьков: Выща школа, 1987. – 144 с.

Поступила в редколлегию 08.09.2010