



УДК 621.165

Член-корреспондент НАН України А. А. Тарелин

Электrofизические аспекты в теории создания и эксплуатации паровых турбин

Представлено новое научное направление в теории паровых турбин — теплоэлектрофизика. Впервые тепловые процессы, происходящие в паровых турбинах, рассматриваются с учетом электрофизических явлений и оценки их влияния на экономичность и надежность. На этой основе предложены практические рекомендации повышения КПД турбоустановок, созданы новые способы диагностики характеристик двухфазного потока, представлена и обусловлена методология электрохимической коррозии металлических конструкций.

Многочисленные исследования показали, что процессы электризации и электрические поля как естественного, так и искусственного происхождения могут оказывать существенное влияние на природные явления и технологические процессы.

Бурное развитие авиации в начале XX века, многочисленные пожары и взрывы, вызванные статическим электричеством, стимулировали исследования в этой области [1]. Развитие промышленности потребовало разработки электрофильтров и способствовало созданию теории и методов расчетов электрогазодинамических систем [2].

Сейчас стало очевидным, что влажный пар всегда электризуется при движении в различных каналах, и кажется странным, что за более чем сто лет эксплуатации паровых турбин явление электризации влажного пара было не только не изучено, но и не обнаружено. Тем не менее явление электризации влажного пара в паровых турбинах было впервые обнаружено и исследовано под руководством автора данной работы только в конце прошлого века. В 1992 г. был зафиксирован факт наличия электрических зарядов в паровом потоке турбины мощностью 50 МВт (ТЭС-2, “Эсхар”, г. Харьков).

Измеренная плотность зарядов за последней ступенью оказалась на порядок выше, чем в грозовом облаке, и составила $\sim 10^{-3}$ Кл/м³ при напряженности электрического поля $\sim 2 \cdot 10^5$ В/м. Дальнейшие исследования на многих других ТЭС и ТЭЦ Украины, России и США подтвердили этот факт. Установлена динамика образования в проточной части зарядов. Их плотность может постепенно возрастать от $\sim 10^{-8}$ Кл/м³ в зоне фазового перехода до $\sim 10^{-3}$ Кл/м³ — на выхлопе турбины.

© А. А. Тарелин, 2013

Такая плотность зарядов в двухфазной среде инициирует электрические разряды и ионизацию пара, что, как известно из теоретических основ физики, может оказывать влияние на свойства рабочего тела, тепломассообменные и газодинамические процессы. Это и было подтверждено впоследствии теоретическими и экспериментальными исследованиями.

На основании полученных новых знаний были скорректированы физические представления о термодинамических и тепломассообменных процессах парового потока с учетом его электризации и разработаны соответствующие математические модели; предложены оригинальные и эффективные способы управления двухфазным потоком, повышающие КПД турбоустановки; разработаны методы диагностики концентрации эрозионноопасной влаги, пульсации потока и др., а также определена степень влияния ранее не учитываемых электрофизикохимических процессов на конструкционную прочность лопаточных аппаратов. Ниже представлена краткая информация о результатах этих исследований.

Математическое моделирование процессов, происходящих при неравновесном расширении пара в двухфазной области при наличии гетерогенных зародышей конденсации, и разработка соответствующих программных комплексов позволяют проектантам турбин с большей достоверностью осуществлять расчеты основных параметров и характеристик установки, что приводит к повышению их эффективности. Результаты этих исследований подробно изложены в [3].

Управление тепловыми процессами с целью повышения КПД турбоустановки в данной работе осуществлялось за счет активации и деактивации плотности зарядов, путем ввода или отвода в рабочую среду электрической энергии на различных стадиях технологического цикла¹. В соответствии с этим разработано два метода.

Представляя первый метод, следует напомнить, что еще известный ученый А. Стодола в своих опытах обнаружил, что процесс конденсации в реальных условиях отличается от равновесного представления — он запаздывает, в результате чего температура пара опускается ниже температуры насыщения, т. е. пар становится переохлажденным. При этом уменьшается его удельный объем и, соответственно, работа расширения, что и является одной из причин уменьшения вырабатываемой мощности современных турбомашин. По оценкам специалистов, снижение мощности по этим причинам может достигать 0,4–0,7%.

По мере расширения пара переохлаждение достигает критического (предельного) значения, после чего возникает спонтанная конденсация, сопровождающаяся скачками давления и изменением других термодинамических параметров пара. Такая конденсационная нестационарность возбуждает колебания в паровом потоке с частотой 500–2000 Гц, что создает дополнительные вибрации, приводит к возрастанию напряжений на 40–50%, интенсифицирует коррозионно-усталостные процессы и может приводить к поломке рабочих лопаток. По мнению многих специалистов [4], на долю повреждений ступеней, работающих в такой нестационарной среде, приходится 20–25% общего числа аварий турбин.

Отсутствие реальных методов управления процессом объемной конденсации до последнего времени являлось сдерживающим фактором развития данного направления. К сожалению, предпринимавшиеся попытки управлять этими процессами до настоящего времени не нашли промышленного применения. Например, использование химических добавок в питательную воду для создания зародышей конденсации оказалось дорогостоящим из-за необхо-

¹В данной статье речь идет только о паровой фазе рабочего тела. Параллельно с этими работами в институте ведутся исследования, связанные с физическими воздействиями на жидкую фазу с целью изменения ее свойств.

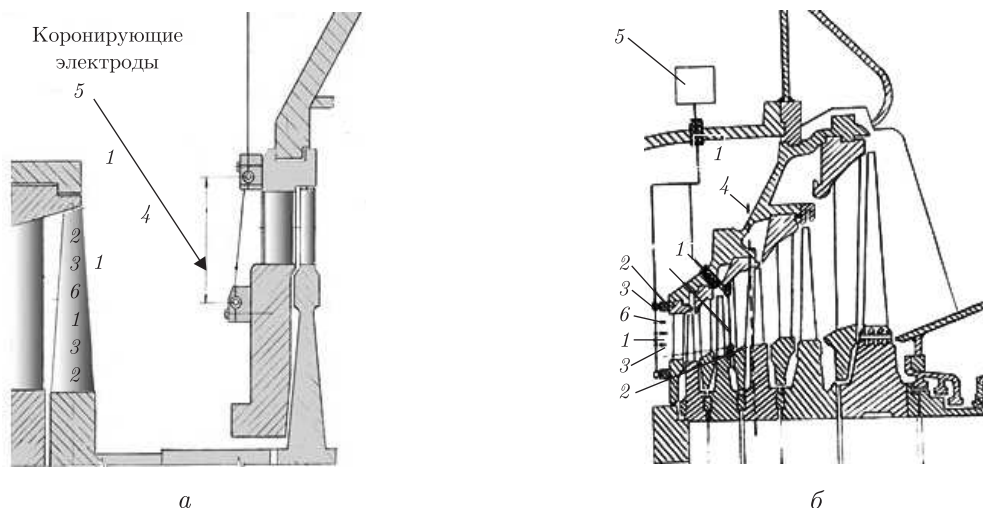


Рис. 1. Размещение коронирующих электродов для ионизации парового потока в проточной части турбины: *a* — перед первой ступенью ЦНД; *б* — непосредственно в проточной части ЦНД (1 — коронирующие электроды; 2 — изоляторы; 3 — коллектор; 4 — зона начала конденсации; 5 — высоковольтный источник; 6 — паровой поток)

димости непрерывного добавления реагентов. Кроме того, продукты разложения реагентов могут негативно отразиться на надежности турбомашин.

Наиболее эффективным для практического использования оказался способ создания зародышей конденсации за счет искусственной ионизации парового потока перед зоной фазового перехода, впервые предложенный А. А. Тарелиным, В. П. Скляровым и О. Вересом [5]. На основании теоретических и экспериментальных, в том числе натуральных, исследований было показано, что концентрация искусственных (за счет ионизации) зародышей, при которой скачок конденсации уже не возникает и процесс максимально приближается к равновесному, имеет значение $J_g \approx 1,4 \cdot 10^{15}$. При этом затраты на ионизацию пара составляют 0,03–0,15% от энергии, выделяющейся при конденсации пара. В качестве источника ионизации необходимо использовать генератор барьерного разряда, обеспечивающий квазинейтральный пар, который не вызывает электрокоррозию в проточной части [3].

Анализ возможного использования ионизации пара в проточной части цилиндра низкого давления (ЦНД), например турбины К-300-240, показал, что прирост мощности ее на номинальном режиме составит ~1500 кВт при затратах энергии на ионизацию пара не более 5 кВт.

На рис. 1 приведены возможные варианты ионизации в ЦНД паровой турбины. Кроме того, имеется принципиальная возможность размещать ионизирующее устройство вне проточной части, что существенно упростит практическую реализацию данной технологии.

Если непосредственно за зоной фазового перехода в проточной части имеет место дефицит зарядов, то за последней ступенью, наоборот, — их избыток. Как показали многочисленные экспериментальные натурные исследования, паровой поток в этой области заряжается положительно, а рабочие лопатки — отрицательно, в результате чего возникает электрическая сила, направленная против движения потока. Это вызывает повышение давления за последней ступенью на 200–350 Па и более, что снижает мощность турбины на ~0,1–0,15%.

Поэтому второй метод повышения эффективности работы турбоагрегата связан с отводом электрической энергии и нейтрализацией зарядов.



Рис. 2. Общий вид нейтрализатора на выхлопе турбины

В ИПМаш НАН Украины разработаны и запатентованы два вида конструкций нейтрализаторов объемного заряда — пассивный и активный, позволяющие устранять негативное влияние этого явления на работу турбины [6]. При использовании пассивного нейтрализатора эффект достигается за счет стекания зарядов из объема пара на “землю”, а активного — за счет добавления в объем компенсирующих зарядов противоположного знака. Общий вид одного из них представлен на рис. 2. Данный нейтрализатор успешно прошел испытания на турбине Т-250/300-240 в г. Харькове.

Установление факта наличия электрических зарядов в паровом потоке открывает широкие возможности в разработке и создании новых методов и устройств в области диагностики.

Рассмотрим разработанный в ИПМаш НАН Украины метод диагностики концентрации крупнодисперсной, эрозионноопасной влаги. Крупные и мелкие капли имеют существенное отличие. Капли, образующиеся в процессе объемной конденсации, очень мелкие и всегда электрически нейтральные, в то время как крупные капли, образующиеся при срыве с поверхностей проточной части (лопаток), несут избыточный электрический заряд. Это различие может быть использовано для контроля наличия и изменения концентрации крупнодисперсной влаги в паровом потоке турбины, что крайне важно для прогнозирования эрозионного разрушения рабочих лопаток.

Основной механизм электризации капель связан с разрывом двойного электрического слоя. Схема образования зарядов на каплях при срыве влаги с кромок рабочих поверхностей приведена на рис. 3, а. На рис. 3, б представлена конструкция зонда, разработанного с учетом сказанного выше. Такой зонд отличается простотой в эксплуатации, высокой надежностью и позволяет контролировать изменение крупнодисперсной влаги при изменении режима работы турбины. Многочисленные эксперименты подтверждают, что зона максимальной концентрации крупнодисперсной влаги по показаниям электрического зонда и зона реального эрозионного разрушения вершины лопатки практически всегда совпадают. Так как в большинстве случаев на практике эрозионный износ имеет место в области вершины лопатки, то для непрерывного его контроля рекомендуется в этой зоне устанавливать стационарный электрический зонд с выводом соответствующей информации на самописец (рис. 3, в), что позволяет определять в реальном масштабе време-

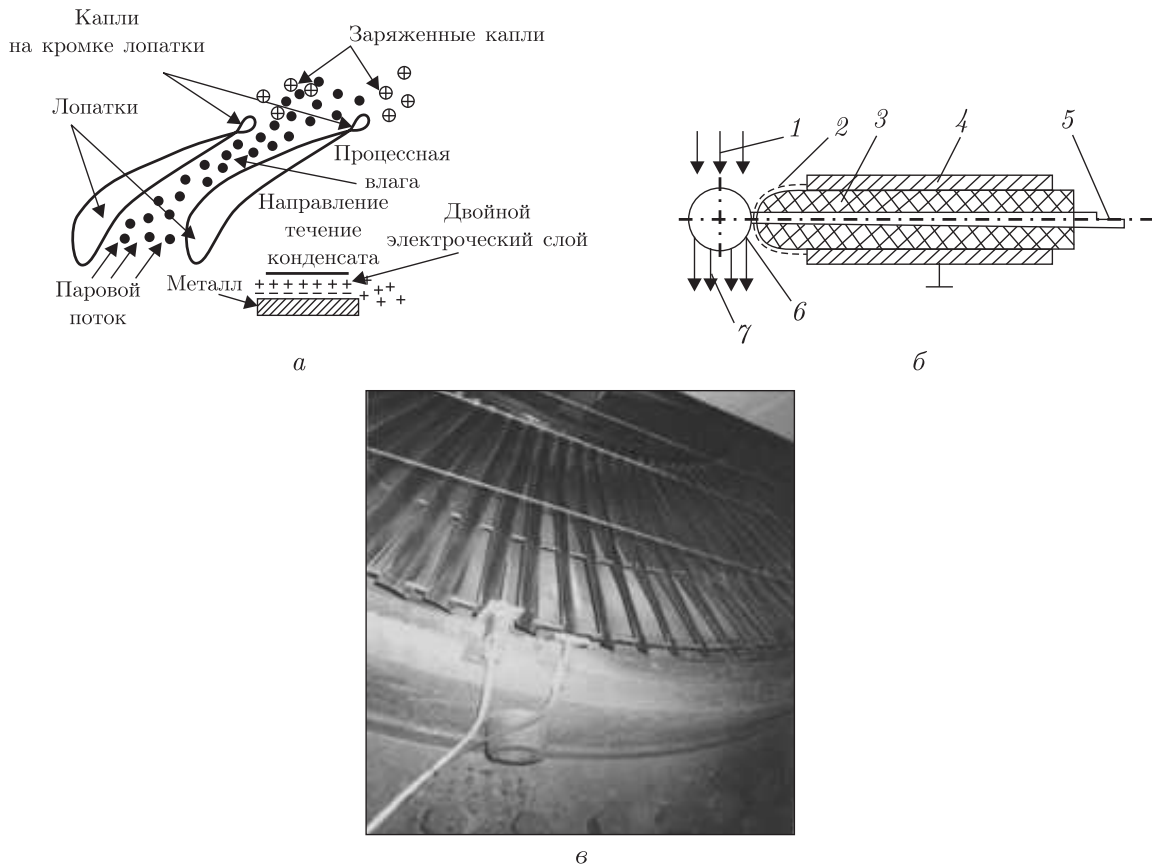


Рис. 3. Электрические зонды и их практическая реализация в турбинах: *a* — схема образования зарядов в паровом потоке; *б* — конструкция зонда (1 — поток, приходящий на зонд; 2 — водяная пленка; 3 — изолятор; 4 — корпус; 5 — вывод зонда); *в* — стационарный электрический зонд за рабочим колесом турбины

ни наиболее опасные, с точки зрения эрозионного износа лопатки, режимы эксплуатации турбин.

Такой подход контроля концентрации крупнодисперсной влаги имеет большое практическое значение при выборе оптимальных режимных параметров эксплуатации турбин. По рекомендациям, изложенным в [7], с целью максимального использования теплоты фазового перехода на переменных режимах рекомендуется снижать до оптимального уровня температуру вторичного пара. В реальных условиях эксплуатации это повышает экономичность турбоустановок на 1–1,5%. В масштабах Украины это позволит получить без существенных капитальных затрат экономию топлива 380 000–570 000 т в год. К сожалению, в настоящее время существует общепринятое мнение, что уменьшение температуры вторичного пара приводит к увеличению влажности, а значит — к увеличению крупнодисперсной влаги и активизации эрозионного износа. Именно это обстоятельство и сдерживало реализацию указанной выше рекомендации. Исследования, проведенные на натуральных объектах с помощью разработанного зонда, показали, что уменьшение температуры вторичного пара хотя и увеличивает влажность, но при этом приводит к перераспределению концентрации мелко- и крупнодисперсной влаги и не всегда приводит к увеличению последней, а чаще — наоборот [7].

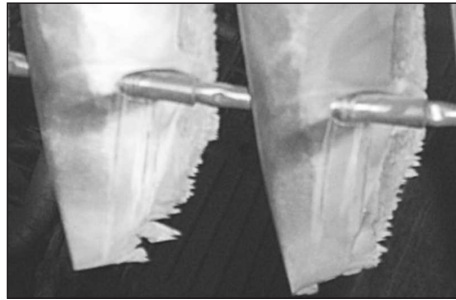


Рис. 4. “Игольчато-пилообразный” рельеф эродированной поверхности лопаток

Поэтому появившаяся возможность контролировать изменение концентрации эрозионно-опасной влаги по сравнению с максимально допустимой дает возможность обоснованно осуществлять выбор оптимальных режимов эксплуатации с точки зрения экономичности и надежности.

Проведенные экспериментальные исследования показали возможность использовать информацию об электрической составляющей пара также для определения неравномерности скорости потока на входе в конденсатор с применением простейших конструкций зондов на постоянной и длительной основе, фиксировать anomальные случаи вибрации лопаток и конструктивные изменения элементов турбины и др.

Электрофизические явления играют немаловажную роль и в понимании процессов, связанных с конструкционной прочностью и разрушением элементов турбомашин.

Анализ существующих представлений физических процессов каплеударной эрозии металлов [8] показывает, что, несмотря на определенные успехи в создании матмоделей и программных продуктов, позволяющих оценивать вероятность эрозионного износа турбинных лопаток, природа этого явления до конца не выявлена.

В настоящее время прогнозирование кинетики эрозионного разрушения рабочих лопаток и оценки их долговечности осуществляется на основе явлений, вызванных упруго-пластическими деформациями от поверхностных колебаний (волн Релея) и приводящих к усталостным разрушениям. При этом на обоснование и анализ механизма возникновения развитого “игольчато-пилообразного” рельефа эродированной поверхности лопаток должного внимания не обращали (рис. 4).

На наш взгляд, такой рельеф поверхности лопатки объяснить только механическим воздействием нельзя. Комплексные исследования электрофизических процессов, возникающих в последних ступенях и в выхлопной части турбин [3], показывают, что каплеударная эрозия — это сложный механо-электрохимический процесс разрушения материала. Возникающие в паровом потоке электрические явления могут вызвать:

- катодное наводораживание металла и, как следствие, проявление водородной хрупкости;
- электроэрозионное или электроискровое разрушения;
- локальный ВЧ нагрев металла до температуры фазово-структурных повреждений;
- разрушение металла по механизму анодного растворения.

Таким образом, одним из основных, после прямого механического воздействия, факторов разрушения материала турбинных лопаток является электрохимический.

Все эти явления и, в большей мере, катодное наводораживание, играют существенную роль в разрушении металла и образовании конфигурации лопаток в виде игло-пилообразной поверхности. Понимание явлений электрохимической коррозии позволяет предложить

практические рекомендации с тем, чтобы исключить негативные последствия деградации конструкции, например, путем нейтрализации зарядов, нагрева поверхности направляющих лопаток и др.

Все вышеприведенные исследования проводились на стендах ИПМаш НАН Украины и на ТЭЦ и ТЭС в Украине, России, США. В результате этих исследований были приведены в соответствие с реальными условиями матмодели термодинамических процессов, протекающих в турбинах; предложены практические рекомендации повышения КПД турбоблоков за счет управления тепловыми процессами на 0,5–0,7%, а с учетом использования рекомендаций по выбору оптимальных режимов — более чем на 1%; созданы новые способы диагностики характеристик двухфазного парового потока; представлена и обоснована методология электрохимической коррозии металлических конструкций, ранее не рассматриваемая в теории турбомашин.

На базе этих результатов впервые в теории и инженерной практике создания и эксплуатации турбомашин сформировалось *новое научное направление — теплоэлектрофизика* [3], основоположниками которого являются украинские ученые.

1. *Аппаратура* для исследования статической электризации самолетов и некоторые результаты измерений / Под ред. И. М. Имянитова // Тр. Главной геофиз. обсерватории. – 1968. – Вып. 225. – С. 106–116.
2. *Ватажин А. Б.* Электрогазодинамические течения. – Москва: Атомиздат, 1983. – 349 с.
3. *Тарелин А. А., Скляр В. П.* Электрофизические явления и неравновесные процессы в паровых турбинах. – Харьков: Изд-во “ФОП Иванченко И. С.”, 2011. – 272 с.
4. *Качуринер Ю. Я., Орлик В. Г.* Особенности начальной конденсации пара и ее влияние на коррозионные повреждения в турбинах // Теплоэнергетика. – 2007. – № 2. – С. 31–34.
5. *Пат.* 2005207880 US, МПК F01D 25/00, F01D 25/30. Electrostatic method and device to increase power output and decrease erosion in steam turbines / Tarelin A. O. (UA), Skliarov V. P. (UA), Weres O. (US); заявитель и патентообладатель Tarelin A. O. (UA), Skliarov V. P. (UA), Weres O. (US). – № 20050034907. – Заявл. 12.01.2005, опубл. 22.09.2005.
6. *Пат.* 2385259 CA, МПК F01D 25/30. Device to increase turbine efficiency by removing electric charge from steam / Tarelin A. O. (UA), Skliarov V. P. (UA), Weres O. (US). – № 20022385259. – Заявл. 16.05.2002, опубл. 22.11.2002. – 16 с.
7. *Скляр В. П.* Повышение экономичности паротурбинных установок с учетом особенностей термодинамических процессов в области двухфазового течения: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Харьков, 2012. – 40 с.
8. *Шубенко-Шубин Л. А., Шубенко А. Л., Ковальский А. Э.* Кинетическая модель процесса и оценка инкубационного периода разрушения материалов, подвергаемых воздействию капельных потоков // Теплоэнергетика. – 1987. – № 2. – С. 46–50.

*Институт проблем машиностроения
им. А. Н. Подгорного НАН Украины, Харьков*

Поступило в редакцию 19.12.2012

Член-корреспондент НАН України **А. А. Тарелін**

Електрофізичні аспекти в теорії створення та експлуатації парових турбін

Подано новий науковий напрям в теорії парових турбін — теплоелектрофізика. Вперше теплові процеси, що відбуваються в парових турбінах, розглядаються з урахуванням електрофізичних явищ і оцінки їх впливу на економічність та надійність. На цій основі запропоновано практичні рекомендації підвищення ККД турбоустановок, створено нові способи діагностики характеристик двофазного потоку, наведено і обґрунтовано методологію електрохімічної корозії металевих конструкцій.

Corresponding Member of the NAS of Ukraine **A. A. Tarelin**

Electrophysical aspects in the theory of design and operation of steam turbines

The article introduces a new scientific direction in the theory of steam turbines such as heat-electro-physics. Thermal processes that occur in steam turbines are examined considering, for the first time, the electrophysics phenomena with evaluation of their influence on the efficiency and the reliability. On this basis, the practical recommendations on increasing the turbo-installation efficiency factor are proposed. The new methods of diagnostics of two-phase flow data are created. A methodology of electrochemical corrosion of metallic constructions is introduced and validated.