

ВОДОПОДГОТОВКА И ВОДНО-ХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ

ВЛИЯНИЕ ВОДНО-ХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА НА ЭЛЕКТРИЗАЦИЮ ПОТОКА ПАРА, НАДЕЖНОСТЬ И ЭКОНОМИЧНОСТЬ ТУРБОУСТАНОВКИ

© 2021 г. А. А. Тарелин^а, *, А. В. Нечаев^а

^аИнститут проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного Национальной академии наук Украины,
ул. Дм. Пожарского, д. 2/10, г. Харьков, 61046 Украина

*e-mail: tarelin@ipmach.kharkov.ua

Поступила в редакцию 28.01.2021 г.

После доработки 10.03.2021 г.

Принята к публикации 21.04.2021 г.

Рассмотрено влияние рН рабочей среды на процессы электризации потока влажного пара и показатели надежности и экономичности турбоустановки. Оценку образования зарядов в потоке в зависимости от водно-химического режима (ВХР) осуществляли на созданном для этих целей лабораторном стенде и непосредственно на турбине. Лабораторный стенд был оснащен системой подачи воздушно-капельного потока, который, проходя через специальное устройство, электризовался, и на выходе фиксировался ток в зависимости от рН среды. Натурные испытания проводили на турбоустановке мощностью 800 МВт на ТЭС “Навахо” (штат Аризона, США). На основании этих исследований было установлено, что при электризации влажного пара в турбине интенсивность образования зарядов и их полярность зависят от рН. В щелочной среде знак зарядов при определенных граничных рН меняется с отрицательного на положительный. Исследования влияния рН питательной воды на эффективность процесса расширения пара в проточной части турбины выполняли на термодинамическом стенде с использованием сверхзвукового сопла и в натуральных условиях на турбине мощностью 800 МВт. Установлено, что при рН 7.0–9.6 существенные изменения как термодинамического процесса в сверхзвуковом сопле на стенде, так и мощности турбины не происходят. Представлено аргументированное объяснение и обоснование этих экспериментальных результатов. Рассмотрено влияние агрессивной заряженной рабочей среды на поверхностную прочность рабочих лопаток, причем исследования в этом направлении базировались на том, что деградация поверхностей лопаток, особенно это касается последней ступени турбины, во многом зависит от интенсивности образования зарядов и их полярности. Определены показатели рабочей среды, которые наиболее существенно (в 1.5–2.0 раза) интенсифицируют электрокоррозионные процессы. Предлагается за счет рационального выбора рН при подготовке питательной воды контролировать процесс образования зарядов потока и управлять им, что даст возможность повысить износостойкость поверхностей лопаток и продлить ресурс их работы.

Ключевые слова: влажно-паровые турбины, водно-химический режим, эффективность, надежность, образование зарядов, полярность, лопатки турбины, сверхзвуковое сопло

DOI: 10.1134/S0040363621110059

При работе влажно-паровой турбоустановки часть тепловой энергии преобразуется в электростатическую энергию потока теплоносителя вследствие его контакта с металлическими элементами конструкций проточной части. При этом потери энергии небольшие, однако влияние электризации теплоносителя на эксплуатационные показатели турбоагрегата весьма ощутимо.

Комплексные исследования, проведенные сотрудниками ИПМаш НАН Украины на различных ТЭС и ТЭЦ Украины, США и России, пока-

зали, что в процессе электризации пара плотность зарядов в потоке может достигать очень высоких значений (на порядок выше, чем в грозовом облаке). Это явление оказывает негативное влияние на работу влажно-паровых турбин [1, 2]:

повышается электрический потенциал ротора; увеличивается риск разрушения подшипников; возрастают противодавление и динамическая нагрузка на рабочие лопатки последней ступени; снижаются экономические показатели и надежность турбин;

происходит наводороживание конструкций проточной части вследствие диссоциации водяных капель в электрическом поле.

Весьма важными являются впервые полученные экспериментально результаты по установлению существенного влияния агрессивной электризованной паровой среды на поверхностную прочность рабочих лопаток [3]. Основные факторы, влияющие на значение и полярность зарядов теплоносителя, — влажность и скорость парового потока, материалы элементов конструкций турбоустановки, омываемых паром, химический состав рабочей среды.

Работы по исследованию электризации влажно-парового потока и влияния на эти процессы химического состава рабочей среды были начаты еще в 80-х годах прошлого столетия, а в 1992 г. эксперименты были проведены в натуральных условиях непосредственно на турбине Т-37/50-8.9 [1]. Во время этих комплексных исследований была осуществлена первая попытка определить возможные изменения экономичности турбины в зависимости от рН рабочей среды. Однако установить какое-либо влияние рН на эффективность работы турбины старого образца не удавалось, как тогда считалось, из-за недостаточно стабильных режимов в этих экспериментах. В то же время в процессе этих исследований впервые в натуральных условиях были получены важные данные по электризации потока.

В технической литературе очень скудно представлена информация о работах в этом направлении. Так, например, в [4] высказано предположение, что электризация потока, зависящая от параметров и свойств паровой среды, может оказывать незначительное влияние на эффективность работы турбоустановки и требуются дополнительные исследования этого явления. В [5] приводятся результаты исследования на экспериментальном стенде электризации чистого пара, в который добавляли аммиак. Несмотря на противоречивость и неоднозначность полученных данных по отношению к реальным условиям, было установлено, что добавка аммиака приводила к уменьшению интенсивности образования зарядов с отрицательной полярностью в потоке. Отмечается также, что изменение рН практически не вызывало интенсификацию конденсации в каналах проточной части стенда. При этом какие-либо объяснения данным явлениям и полученным результатам авторы не предлагают. В технической литературе нет также информации о натуральных исследованиях в этом направлении. Все выше представленные проблемы требуют более основательного и конкретного анализа.

ВЛИЯНИЕ рН НА ЭЛЕКТРИЗАЦИЮ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

В паровом потоке турбин носителем зарядов является влага, а объемный заряд пропорционален ее концентрации. При этом, несмотря на существенные различия между процессами электризации капель в воздушном потоке при атмосферном давлении и в паровом потоке при пониженном давлении, механизмы образования зарядов на каплях воды в основном остаются одинаковыми. В ИПМаш НАН Украины исследование процессов электризации в воздушно-капельном потоке выполняли на лабораторном стенде [1], который состоял из систем организации воздушного потока, его заряджения и измерения электрических параметров. Для исследования зависимости тока электризации от параметров потока была использована схема, показанная на рис. 1.

Воздушно-капельный поток 1 вытекает из сопла 2 и проходит через электрод 3, представляющий собой кольцо диаметром 100 мм с сеткой, имеющей проницаемость 0.8. При движении через сетку часть капель, содержащихся в потоке, оседает на ней. При отрыве капель от сетки происходит электризация потока, т.е. возникает ток выноса, который контролируется микроамперметром 5. С помощью статического вольтметра 6 может измеряться потенциал, возникающий на электроде 3 при прохождении через него потока. На расстоянии 100–300 мм от электрода 3 устанавливается электрод-коллектор 4, представляющий собой кольцо диаметром 300 мм с сеткой, имеющей проницаемость 0.98, из нержавеющей стали. Благодаря большой проницаемости, а также удаленности электрода 4 от сопла 2 его электризация практически не влияет на результаты эксперимента. Электрод 4 позволяет контролировать ток выноса с электрода 3.

При проведении исследований на стенде необходимо было создать условия, адекватные существующим в паровых турбинах, прежде всего по количеству влаги в единице объема. Поэтому в целях приближения к реальным условиям в турбине был использован параметр “водность” (количество воды в единице объема среды), применяемый в метеорологии. Водность пара на выходе турбин зависит от его влажности и давления в конденсаторе. Анализ режимов работы некоторых турбинных установок показал, что водность потока пара за последними ступенями низкого давления составляет 2.0–4.5 г/м³ при давлении в конденсаторе примерно 4.5 кПа и влажности пара 10%. Применительно к стендовым условиям водность была принята равной 3.5 г/м³.

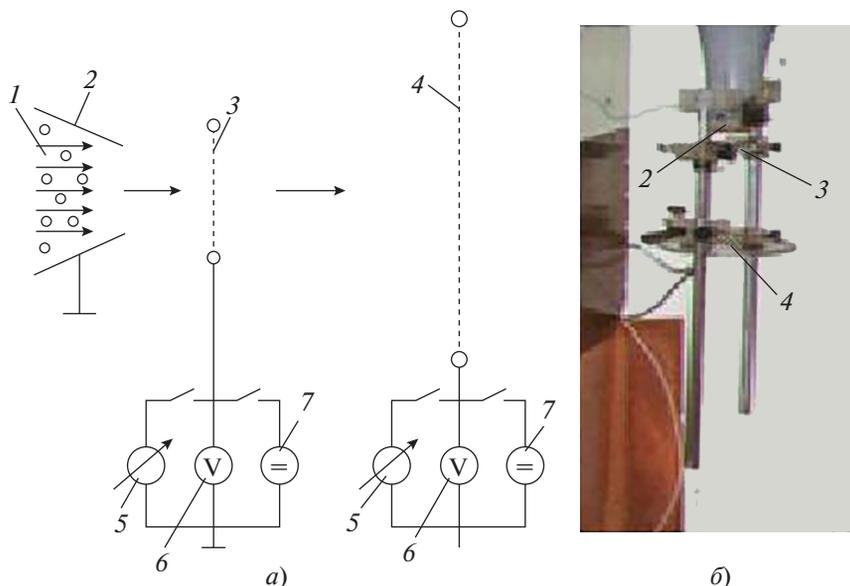


Рис. 1. Электрическая схема (а) и общий вид устройства измерения тока выноса воздушно-капельного потока (б). 1 – воздушно-капельный поток; 2 – сопло; 3 – электрод-сетка; 4 – электрод-коллектор; 5 – микроамперметр; 6 – вольтметр; 7 – конденсатор

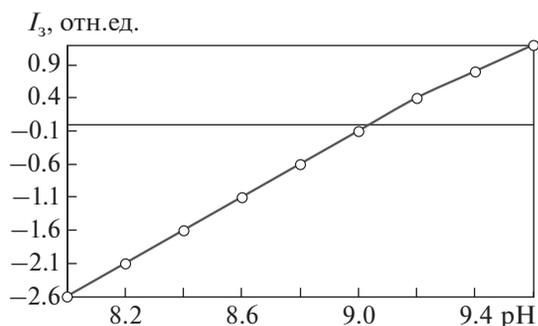


Рис. 2. Зависимость тока зонда от pH воды

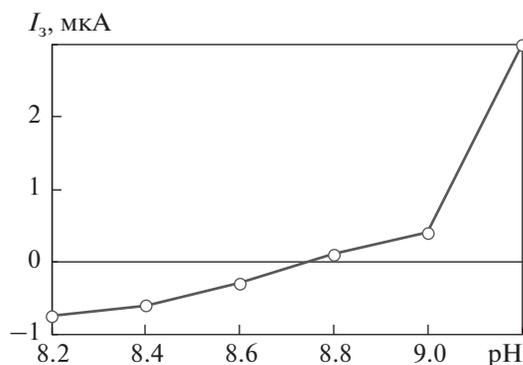


Рис. 3. Зависимость тока зонда за последней ступенью турбины 800 МВт от pH питательной воды

Скорость воздушно-капельного потока и водность поддерживали постоянными, так как эти параметры оказывают наиболее существенное влияние на интенсивность заряжения капель по-

тока [1]. В воду, используемую для создания воздушно-капельного потока, дозировали раствор аммиака для изменения ее pH. Во время эксперимента измеряли ток зонда 4 (ток электризации) I_3 (см. рис. 1) при различных pH воды. Результаты эксперимента представлены на рис. 2.

Для выяснения возможности управления процессом электризации пара непосредственно в турбине путем изменения pH питательной воды были выполнены исследования на турбоустановке 800 МВт электростанции “Навахо” (штат Аризона, США) совместно с Sonoma Research Company по заданию EPRI США. Во время эксперимента для изменения pH питательной воды в нее дозировали раствор аммиака. Объемную плотность зарядов в паровом потоке за последней ступенью турбины контролировали с помощью электрического зонда. Результаты исследований представлены на рис. 3.

В конденсате, образующемся в проточной части турбины, pH не измеряли, однако в работе [6] показано, что pH конденсирующейся влаги при этом обычно смещается в сторону уменьшения, т.е. в кислотную область.

Таким образом, результаты проведенных экспериментов свидетельствуют о том, что интенсивность образования зарядов в паровом потоке и их полярность зависят от pH среды. При этом существуют граничные значения pH, при которых знак зарядов меняется с отрицательного на положительный.

Характер изменения тока зонда обусловлен особенностями процесса спонтанной электризации конденсирующегося двухфазного потока. Следует отметить, что этот процесс является весьма сложным и в настоящее время до конца не изученным. Известно, что он включает в себя комплекс физических и физико-химических механизмов, в том числе электризацию баллоэлектрическую (разрушение крупных капель от удара), электрохимическую и разрушение двойного электрического слоя. Как показали экспериментальные исследования, наибольшее влияние на интенсификацию процесса электризации оказывают скорость и влажность потока, что объясняется эффектами разрушения двойного электрического слоя и баллоэлектрическим эффектом [1, 7]. Что касается электрохимических процессов, то с учетом различной концентрации аммиака их следует рассматривать в совокупности с общими процессами образования зарядов в качестве преобладающего фактора, влияющего на знак заряда капель.

ВЛИЯНИЕ ВОДНО-ХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА НА ПРОЦЕСС РАСШИРЕНИЯ ПОТОКА ПАРА В ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ СВЕРХЗВУКОВОГО СОПЛА И ТУРБИНЕ

Влияние ВХР на изменение характеристик потока пара в проточной части турбины было исследовано на созданном в ИПМаш НАН Украины универсальном термодинамическом стенде. На

этом стенде можно также изучать электрофизические явления в проточной части сверхзвукового сопла. Общий вид стенда показан на рис. 4, принципиальная схема – на рис. 5.

Одним из главных элементов экспериментального стенда является плоское конфузорно-диффузорное сверхзвуковое сопло (рис. 6). Канал сопла образован двумя профильными и двумя плоскими стеклянными пластинами. В верхней профильной пластине сопла выполнены отверстия диаметром 1,5 мм для измерения давления.

Конструкция стенда позволяет проводить исследование, используя чистый (дистиллированный при различных рН) и ионизированный пар. Кроме того, можно исследовать влияние ионизации пара на переохлаждение потока. В питательной воде конкретные значения рН достигали путем дозирования в нее раствора аммиака. Ионизированный пар получали с помощью специального разрядного устройства [1]. Задача экспериментов заключалась, с одной стороны, в проверке возможности снижения переохлаждения, равного 22°C, вследствие дополнительного образования ядер конденсации при изменении рН среды и повышения в связи с этим эффективности процесса расширения в сверхзвуковом сопле. С другой стороны, требовалось исследовать влияние изменения теплофизических свойств рабочего тела при рН 7–10 на конденсацию при отсутствии переохлажденного пара, достигаемую в данном случае



Рис. 4. Общий вид стенда

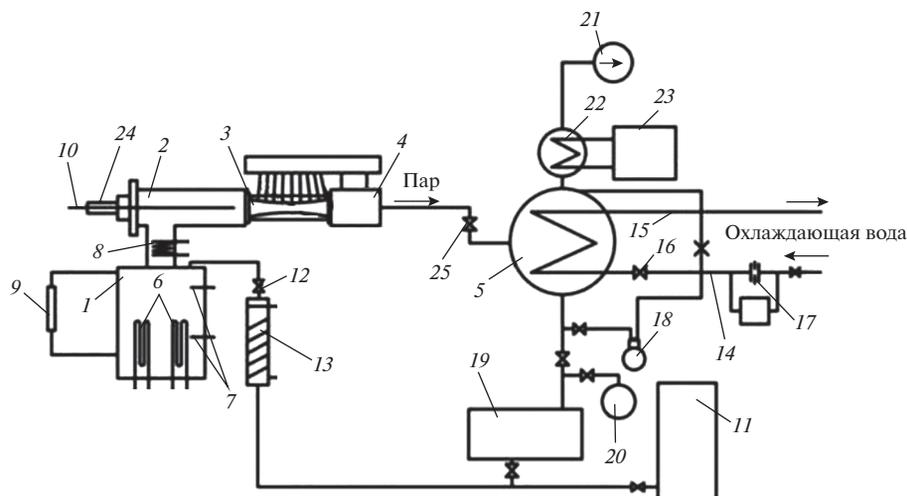


Рис. 5. Принципиальная схема экспериментального парового стенда.

1 – паровой котел; 2 – камера паровпуска; 3 – сопло; 4 – выхлопной патрубок; 5 – основной конденсатор; 6 – тепловой электрический нагреватель; 7 – датчик уровня воды; 8 – пароперегреватель; 9 – водомерное стекло; 10 – ионизатор; 11 – бак подпитки; 12 – игольчатый кран; 13 – подогреватель питательной воды; 14 – напорный трубопровод; 15 – сливной трубопровод; 16, 25 – шаровый кран; 17 – сужающее устройство; 18 – мерная емкость; 19 – конденсатосборник; 20 – компрессор; 21 – вакуумный насос; 22 – вспомогательный конденсатор; 23 – термостат; 24 – изолятор

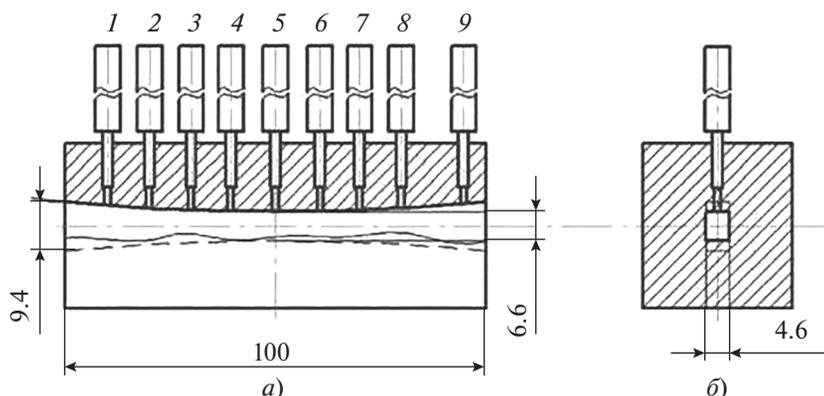


Рис. 6. Конфузорно-диффузорное сопло.

а – продольный разрез; б – поперечный разрез; 1–9 – номера точек (канал) измерения давления

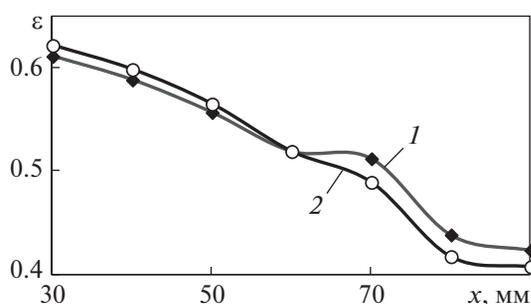


Рис. 7. Зависимость относительного давления ϵ по длине сопла x при $p_0 = 60.0$ кПа, рН 8.2 и температуре пара перед соплом $t_0 = 89.5^\circ\text{C}$. 1 – переохлажденный пар; 2 – равновесный (ионизированный) пар

искусственной ионизацией потока, т.е. в условиях, максимально приближенных к равновесному расширению пара. Опыты проводили при постоянном давлении пара перед соплом 60 кПа, начальную температуру изменяли в диапазоне от температуры насыщения 89.5 до 100°C .

Исследования процесса расширения пара в сопле со сверхзвуковой скоростью показали, что характер распределения относительного давления $\epsilon = p/p_0$ (здесь p, p_0 – давление, измеренное по длине сопла и на входе в него) существенно изменяется (рис. 7). Видно, что при расширении нейтрального пара за горлом сопла наблюдается уменьшение градиента давления, вызванное спон-

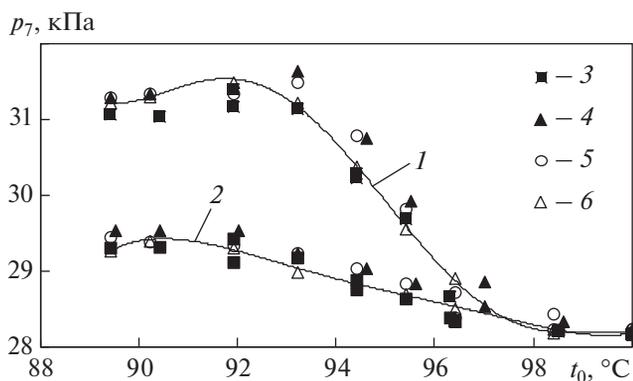


Рис. 8. Зависимость давления в точке 7 сопла переохлажденного (1) и равновесного (2) пара от температуры перед соплом.
рН: 3 – 8.2; 4 – 6.7; 5 – 8.9; 6 – 10.2

танной конденсацией и имеющего вид некоторого скачка (см. рис. 7, линия 1). В результате расширения ионизированного пара давление монотонно снижается практически по всей длине сопла (см. рис. 7, линия 2). При этом на искусственных зарядышах в течение всего процесса расширения происходит дополнительная конденсация, и он становится максимально приближенным к равновесному.

В целях упрощения и большей наглядности на рис. 8 приведена зависимость давлений переохлажденного и равновесного пара p_7 в наиболее чувствительной точке 7 (см. рис. 6) в выходной зоне проточной части сопла, в которой наблюдалось наибольшее влияние ионизации, от начальной температуры пара перед соплом.

Как следует из рис. 8, давления переохлажденного и равновесного потоков пара практически не изменяются при всех исследованных рН питательной воды и зависят в основном только от начальной температуры пара. Небольшое уменьшение давления исходного нейтрального пара отмечается при рН 8.2, что можно объяснить погрешностью измерения.

Данный эксперимент, во-первых, еще раз убедительно подтвердил эффективность искусственной ионизации, позволяющей организовать достаточное количество ядер конденсации для достижения практически равновесного процесса расширения пара, и, во-вторых, показал, что изменение рН питательной воды в диапазоне от 7.0 до 9.6 практически не влияет ни на абсолютные значения давления переохлажденного пара в проточной части сверхзвукового сопла (см. рис. 8, линия 1), ни на повышение эффективности при равновесных процессах (см. рис. 8, линия 2), а значит, и на эффективность процесса расширения.

Исследования влияния рН на эффективность работы реальной турбины были выполнены на турбоагрегате мощностью 800 МВт на ГЭЦ в США при рН 8.0–9.4. Было установлено, что изменения водно-химического режима при эксплуатации турбоустановки не оказывают существенного влияния на ее мощность.

Отсутствие ожидаемых эффектов при натуральных экспериментах объясняется следующими обстоятельствами. В начальных зонах фазового перехода, где, как правило, имеет место большое переохлаждение, количества ядер конденсации, создаваемых потоком, в том числе от дополнительного влияния рН, явно недостаточно для ощутимого влияния на термодинамический процесс. Вместе с тем большая плотность естественных зарядов, как отмечалось ранее, наблюдается в зоне последней ступени турбины, что могло бы снизить переохлаждение и повысить эффективность процесса расширения пара [1]. Но, в виду того что переохлаждение потока здесь уже минимально, возможный достижимый эффект вследствие интенсификации электризации каплей при изменении рН будет тоже незначительным. Если учесть, что на выходе из последней ступени турбины этот эффект дополнительно нейтрализуется потерями от электростатических сил, направленных против потока [2], то, вероятно, все эти обстоятельства и объясняют полученные ранее результаты.

Основываясь на проведенных авторами исследованиях и других немногочисленных работах в этой области, следует пока констатировать, что изменение рН в диапазоне 7.0–10.0 при формировании ВХР не оказывает какого-либо заметного влияния на эффективность работы турбины.

ВЛИЯНИЕ ВОДНО-ХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА НА НАДЕЖНОСТЬ ЛОПАТОЧНЫХ АППАРАТОВ ТУРБОУСТАНОВКИ

Движение заряженного потока влажного пара, в котором изменяются плотность объемного заряда и скорость заряженных частиц, происходят дробление, слияние и коронирование заряженных капель, сопровождается индуцированием вторичных зарядов и токов в деталях проточной части турбины, а также возникновением электромагнитных излучений в зоне последних ступеней и в выхлопном патрубке [7]. Проведенные авторами эксперименты с воздействием потока пара на лопатки турбины показали, что такая заряженная дисперсная среда является дополнительным фактором, интенсифицирующим деградацию их поверхностей [3]. Характер воздействия заряженного парового потока зависит от скорости его соприкосновения с поверхностью лопатки, знака

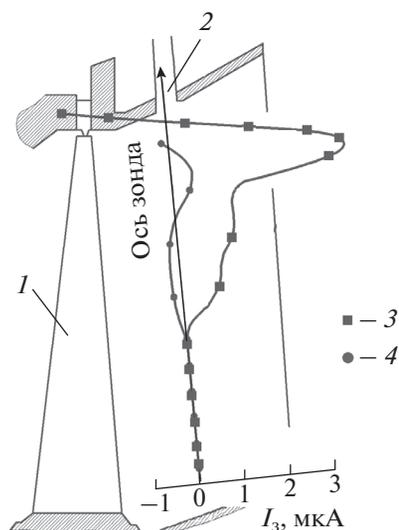


Рис. 9. Распределение зарядов за последней ступенью турбины мощностью 800 МВт.
1 — рабочая лопатка; 2 — канал ввода подвижного зонда;
рН: 3 — 9.3; 4 — 8.7

заряда, физико-химических свойств рабочей среды, в которой происходит взаимодействие, исходного состояния поверхности и ее электрического потенциала. Электризация вызывает существенное усиление (по отношению к нейтральному влажному пару) электрохимических процессов. При этом изменяется кинетика накопления поврежденности поверхностного слоя металла вследствие капельно-ударного воздействия, электрохимических процессов, абсорбции водорода, изменения механических свойств металла под действием электрического поля. Причем наибольший вклад в изменения механических свойств вносит абсорбция водорода. В условиях близких к процессам, реально происходящим в проточной части турбины (в вакуумированной системе), наибольшее разрушающее (до 50%) воздействие на поверхность лопаток оказывает положительно заряженный поток, а поток с отрицательной полярностью обладает минимальным разрушающим эффектом [3]. По предварительной оценке, комплексное негативное капельно-ударное и электрофизическое воздействие потока с положительной полярностью уменьшает инкубационный период и интенсифицирует эрозионно-коррозионные процессы примерно в 2 раза.

Кроме того, следует также помнить, что интенсификация процессов электризации парового потока при нерациональном выборе рН питательной воды в ВХР может привести к повышению электрического потенциала ротора и, как следствие, в случае нарушения узла заземления

ротора — к электроэрозионному разрушению подшипника.

Вместе с тем экспериментально установлен факт влияния рН среды на интенсивность образования заряда потока пара и его полярность. Эти процессы, по мнению авторов, не связаны с процессной влагой, а являются следствием пленочной конденсации на поверхности лопатки, т.е. фактором, в большей степени влияющим на надежность, нежели на показатели экономичности. При этом изменение свойств среды (рН) приводит к изменению сил поверхностного натяжения водного (пленочного) конденсата, что, в свою очередь, способствует изменению дисперсности срывающихся с лопатки капель и степени их электризации и полярности зарядов, т.е. параметров, существенно влияющих на поверхностную прочность лопатки.

Все приведенные выводы и полученные прочностные показатели элементов турбоустановки напрямую связаны с ВХР при подготовке питательной воды, так как в зависимости от содержания в ней аммиака происходит как интенсификация (или минимизация) естественных процессов образования зарядов, так и изменение их полярности (см. рис. 2, 3). Следовательно, на взгляд авторов, учитывая изложенные выше обстоятельства, к основным показателям ВХР необходимо добавить рекомендации по рН, при которых минимизируются условия, ускоряющие деградацию металла лопаток и подшипников (рН 8.8–9.1). При этом надо понимать, что для каждой турбоустановки эти эксплуатационные показатели рабочей среды должны определяться индивидуально путем соответствующих замеров плотности зарядов с помощью электрических зондов и утверждаться только в том случае, если они не противостоят более весомым технологическим нормативам. Предлагаемое нормирование (контроль) ВХР по образованию зарядов во влажно-паровом потоке позволит продлить ресурс работы лопаток цилиндра низкого давления и снизить вероятность электроэрозионного разрушения подшипников.

Из всего сказанного следует, что рациональным выбором рН можно минимизировать негативное влияние электризации на поверхностную прочность лопатки путем придания потоку нейтрального или минимально отрицательного потенциала, как это, например, достигалось в процессе специальных исследований на турбине 800 МВт с регистрацией заряда подвижным электрическим зондом (рис. 9). Применительно к реальным условиям эксплуатации задача регистрации зарядов может быть существенно упрощена, если учесть, что наиболее интенсивный эрозионно-коррозионный



Рис. 10. Стационарный электрический зонд, установленный за последней ступенью турбины.
1 – электрический зонд; 2 – рабочие лопатки

износ рабочих лопаток последних ступеней турбины происходит в их периферийной зоне. Поэтому на практике оказалось достаточным использовать для указанной цели стационарный электрический зонд за последней ступенью на расстоянии 40–60 см от вершины лопатки (рис. 10).

Такой способ подавления электризации с помощью коррекцией ВХР может быть реализован при применении автоматизированной системы с использованием датчика электризации парового потока, конструкция которого подробно представлена в [7, 8].

ВЫВОДЫ

1. Экспериментально установлен факт влияния рН среды на интенсивность образования зарядов в потоке пара и их полярность. При увеличении рН более 7.0 отрицательный ток электризации постепенно уменьшается до нуля (в зоне рН 8.8–9.0), при дальнейшем увеличении рН концентрация зарядов с положительной полярностью растет.

2. Изменение рН теплоносителя в диапазоне 7.0–10.0 не приводит к каким-либо заметным повышению эффективности работы турбины.

3. Высокая плотность зарядов, наличие постоянных и переменных электрических полей в турбине вызывают электрохимическую коррозию металла и снижают поверхностную прочность лопаточных аппаратов. Поскольку рН среды – один из факторов, во многом определяющих эти процессы, появляется возможность с помощью ВХР управлять явлениями, связанными с электризацией пара.

4. Электризация пара способна вызывать накопление электростатического заряда на роторе, следствием чего могут стать электрический пробой масляной пленки подшипников и электроэрозионное повреждение вкладышей.

5. Наличие в потоке пара зарядов различной плотности (от 10^{-11} до 10^{-3} Кл/м³) в проточной части турбины и за ее последней ступенью и весомое влияние этого явления на эрозионно-коррозионные процессы в лопаточных аппаратах цилиндра низкого давления инициируют рассмотрение вопроса о необходимости дополнительного нормирования рН среды.

6. Реализация контроля за образованием зарядов во влажном паре с помощью электрических зондов приведет к продлению ресурса рабочих лопаток и подшипников турбины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Тарелин А.А., Скляр В.П.** Паровые турбины: электрофизические явления и неравновесные процессы. СПб.: Энерготех, 2012. (Сер.: Проблемы энергетики. Вып. 9.)
2. **Тарелин А.А.** Постфакторные явления электризации влажно-парового потока в турбинах // Теплоэнергетика. 2017. № 11. С. 32–39. <https://doi.org/10.1134/S00403636171100>
3. **Тарелин А.А., Сурду Н.В., Нечаев А.В.** Влияние электризации влажно-парового потока на поверхностную прочность материалов лопаток турбины // Теплоэнергетика. 2020. № 1. С. 72–81. <https://doi.org/10.1134/S0040363620010075>
4. **Petr V., Kolovratnik M.** Electrostatic charge of fine and coarse droplets in LP steam turbines // Proc. of the 14th Intern. Conf. on the Properties of Water and Steam. Kyoto, Japan, 2004. P. 606–611.
5. **Buckley J.R.** A study of heterogeneous nucleation and electrostatic charge in steam flows. Birmingham, UK, University, 2004.
6. **Образование** коррозионно-активных сред в зоне фазового перехода в паровых турбинах / О.И. Мартынова, О.А. Поваров, Т.И. Петрова, В.Н. Семенов, А.Н. Троицкий, А.Ю. Петров, Р.Б. Дули // Теплоэнергетика. 1998. № 7. С. 37–42.
7. **Тарелин А.А.** Теплоэлектрофизические процессы в паровых турбинах. Харьков: Изд-во “Иванченко И.С.”, 2020.
8. **Pat. 5,992,152 US.** Method for controlling electric charge within the exhaust hood and condenser of a steam turbine / O. Weres, A.O. Tarelin, V.P. Skliarov, Y.I. Sergienko. Заявл. 10.05.1998. Оpubл. 30.05.1999.

Influence of Water-Chemical Regime on Electrization of Steam Flow, Reliability and Efficiency of a Turbo Unit

A. A. Tarelin^{a, *} and A. V. Nechaev^a

^a Podgorny Institute of Mechanical Engineering Problems, National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, 61046 Ukraine

*e-mail: tarelin@ipmach.kharkov.ua

Abstract—The influence of the pH of the working medium on the processes of electrification of the wet steam flow and the indicators of the reliability and efficiency of the turbine plant are considered. The assessment of the formation of charges in the flow, depending on the water-chemical regime (WCR), was carried out on a laboratory bench created for this purpose and directly on the turbine. The laboratory bench was equipped with an air-droplet flow supply system, which, passing through a special device, electrified, and the current was recorded at the exit depending on the pH of the medium. Full-scale tests were carried out on an 800 MW turbine unit at the Navajo TPP (Arizona, United States). On the basis of these studies, it was found that the intensity of the formation of charges and their polarity depend on pH during the electrification of wet steam in a turbine. In an alkaline medium, the sign of the charges at certain boundary pH changes from negative to positive. The study of the influence of the pH of the feed water on the efficiency of the steam expansion process in the flow path of the turbine was carried out on a thermodynamic bench using a supersonic nozzle and in natural conditions on a turbine with a capacity of 800 MW. It was found that significant changes in both the thermodynamic process in the supersonic nozzle at the test bench and the turbine power do not occur at pH 7.0–9.6. A well-reasoned explanation and justification of these experimental results is presented. The influence of an aggressive charged working medium on the surface strength of rotor blades is considered, and studies in this direction were based on the fact that the degradation of the blade surfaces, especially the last stage of the turbine, largely depends on the intensity of the formation of charges and their polarity. The indicators of the working environment that most significantly (by 1.5–2.0 times) intensify electrocorrosive processes are determined. It is proposed, due to the rational choice of pH in the preparation of feed water, to control the process of formation of flow charges and control it, which will make it possible to increase the wear resistance of the surfaces of the blades and extend their service life.

Keywords: wet steam turbines, water chemistry, efficiency, reliability, charge formation, polarity, turbine blades, supersonic nozzle