

УДК 532.5, 536.2, 621.183, 621.039.5

**СНИЖЕНИЕ ЭРОЗИОННОГО ИЗНОСА ЦИЛИНДРА  
СРЕДНЕГО ДАВЛЕНИЯ ПАРОВЫХ ТУРБИН,  
РАБОТАЮЩИХ НА ЗАКРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРАХ**

**Кандидаты техн. наук КАЩЕЕВ В. П., ХАИМОВ В. А., инж. ВОРОНОВ Е. О.,  
асп. КАЩЕЕВА О. В., докт. техн. наук СОРОКИН В. Н.**

*Белорусский национальный технический университет,  
АООТ «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию  
энергетического оборудования имени И. И. Ползунова»,  
РУП «Минскэнерго»,  
Национальная академия наук Беларуси*

На внутренней поверхности нагрева труб котлов сверхкритического давления при окислении их металла образуется оксидная пленка толщиной от 0,1 до 0,25 мм. При изменении температуры у металла труб и пленки происходит различное расширение (из-за разных коэффициентов температурного расширения), что ослабляет сцепление пленки с металлом и при соответствующих условиях, зависящих прежде всего от толщины пленки

и температурного изменения, может привести к ее отслоению. Это возможно при пусках котла из холодного состояния, его останове, изменениях температурного режима. Отслоившиеся кусочки окалины попадают в пар и вместе с ним проходят по тракту энергоустановки. Если это происходит в промежуточном пароперегревателе, то пар вместе с частичками окалины поступает в цилиндр среднего давления (ЦСД) турбины. По исследованиям НПО ЦКТИ, размер выделенных из пара частичек на входе ЦСД достигает 1–3 мм. Эти частички имеют неправильную форму плоских многоугольников. Паровой поток с такими частицами обладает абразивными свойствами и с течением времени разрушает проточную часть турбины, прежде всего рабочие лопатки первых ступеней ЦСД. Скорость образования окалины зависит от сорта стали труб и температурного режима, наличия кислорода для окисления. Поэтому если сравнить пароперегреватели первичного (острого) пара и промежуточного пара (после работы пара в цилиндре высокого давления – ЦВД), то при одинаковых марках стали труб и подобных температурных режимах должно образовываться примерно одинаковое количество продуктов окисления (окалины в основном пароперегревателе должно быть немного больше, так как там больше кислорода и более жесткий температурный режим) и паровой поток должен обладать похожими абразивными свойствами, а поскольку острый пар более плотный – имеет давление примерно в шесть раз выше, его абразивные свойства должны быть не меньшими, чем у пара промперегрева. То есть проточная часть двух цилиндров – ЦВД и ЦСД – должна изнашиваться примерно одинаково. Но на практике оказалось, что лопатки ЦСД изнашиваются больше, причем это видно даже невооруженным глазом. Острый пар закритических параметров несет в ЦВД мало твердых частиц, а на выходе из ЦВД их еще меньше из-за сепарации и удаления с отборами пара на регенеративный подогрев питательной воды.

Объясняется это следующим образом. Современные мощные энергоблоки работают на сверхкритических параметрах пара. Наметила тенденция к дальнейшему росту параметров пара (температуры – до 700 °С; давления – до 35 МПа), так как при этом существенно возрастает эффективность процесса и уменьшаются затраты топлива на выработку электроэнергии. Однако при использовании пара закритических параметров в турбине проявляется особенность такого состояния, которая заключается в том, что пар в этом состоянии обладает одновременно свойствами и пара и жидкости, в том числе способностью растворять соли и другие соединения. При этом пар можно сжать до плотности, большей, чем у жидкости, т. е. такой пар сжимаем, а жидкость практически не сжимаема. В процессе срабатывания теплоперепада в проточной части турбины давление пара снижается. После снижения параметров пара ниже критических (давление – менее 22 МПа; температура – менее 374 °С) свойства пара изменяются. И если до этого он обладал свойствами, присущими пару и жидкости одновременно, в том числе достаточно хорошо растворял различные вещества (включая соли, окислы, кремнекислоту), то теперь свойства жидкости отсутствуют (в том числе свойства растворять различные вещества). Способность пара растворять соли в небольшой степени сохраняется до 7 МПа. Поэтому ранее растворенные вещества (в том числе растворенная в нем

окалина внутренней поверхности нагрева котла) выпадают в виде твердых частиц, кристаллов, обладающих острыми гранями, оседают на уже имеющихся «старых» частицах, которые движутся вместе с паром. Движение пара внутри труб промежуточного пароперегревателя турбулентное, это можно видеть после определения числа Рейнольдса.

Расчеты, проведенные для промежуточного пароперегревателя котла ТГМП-314, откуда пар поступает в ЦСД-1 турбины Т-250/300-240, показывают, что при скорости пара, даже равной 1 м/с, при внутреннем диаметре, равном 34 мм, кинематической вязкости пара, равной  $2,07 \cdot 10^{-6}$ , м<sup>2</sup>/с, для средних по промежуточному пароперегревателю значений давления (3,8 МПа) и температуры (420 °С) число Рейнольдса составляет  $1,65 \cdot 10^5$ . Общеизвестно, что при  $Re \geq 10^4$  движение будет развитым турбулентным. В такой среде происходит интенсивное перемешивание, образуются вихри. А в вихрях, так же как и на поворотах, твердые частицы получают значительное ускорение. К тому же повороты потока создают вращение потока пара, проявляющееся и после его прохождения. В криволинейном движении «старые» и «новые» частицы приобретают компоненту скорости, расположенную под углом к основному движению, т. е. направленную к стенке. Все это приводит к тому, что образовавшиеся твердые частицы сталкиваются со стенкой, передавая окалине свою кинетическую энергию. Ударяя по внутренней поверхности трубы, покрытой окалиной, они вырывают (вырезают) кусочки окалины (или даже металла из труб) по всему тракту движения пара. Эти фрагменты служат дополнительными центрами кристаллизации, которые по пути движения пара «обрастают» дополнительным слоем вещества, увеличивая их массу и соответственно кинетическую энергию. Это способствует усилению коррозии, что приводит к появлению дополнительных количеств окалины в паре, проходящем через турбину или другое оборудование. Причем микротвердость частиц, находящихся в паре, в 3,5–5,0 раза превышает твердость сталей проточной части турбины. Сложность устранения этого явления состоит в том, что твердые вещества выпадают из пара после снижения параметров ниже критических не мгновенно, а во времени. К тому же все это происходит в паре, движущемся с большой скоростью.

Верность объяснения картины (механизма) абразивного износа проточной части ЦСД турбины подтверждается фактом, что путь прохождения рабочего тела от питательной воды до перегретого пара первоначальных параметров (температура составляет 545 °С, давление – 240 атмосфер) в котле не меньший, чем путь в промежуточном пароперегревателе котла пара вторичного (промежуточного) перегрева (путь пара в промежуточном пароперегревателе котла ТГМП-314 составляет около 100 м по трубе внутренним диаметром 34 мм при изгибах через каждые 6 м). Разрушений проточной части цилиндра высокого давления турбины, куда поступает острый пар, при закритических параметрах пара практически не наблюдается, хотя окалина на внутренних поверхностях нагрева в трубах в котле образуется не в меньшей степени, к тому же соли, содержащиеся в питательной воде, отлагаются на трубах или же переходят в пар. Пар закритических параметров частично растворяет и уносит с собой окисную пленку. То есть

концентрация солей в паре за критических параметров значительно выше, чем в паре до критических параметров.

Верность высказанных предположений подтверждает также то, что в застойных зонах, например на внутренней поверхности бандажа рабочих лопаток первой ступени ЦСД-1, при работе (как показали осмотры при ремонтах) образуется толстый слой солевых отложений. А если бы все дело было только в срыве окалины с внутренней поверхности труб пароперегревателей, то таких отложений не было бы.

Известно много различных технических решений по защите проточной части ЦСД от эрозии [1–3], например способ защиты от абразивного износа элементов цилиндра среднего давления турбин, работающих на критических параметрах, реализованный в [4]. Изобретение разработано применительно к турбине Т-250/300-240, где ввод пара в ЦСД-1 происходит через два паропровода, оси входных патрубков которых расположены под углом друг к другу. Для повышения надежности и экономичности первых ступеней ЦСД-1 турбины за счет снижения абразивного износа лопаточного аппарата и надбандажных уплотнений организованы три отбора пара с твердыми частицами: первый – из камеры паровпуска, второй – из цилиндра среднего давления за 13-й ступенью рабочих лопаток, третий – из цилиндра среднего давления за 14-й ступенью рабочих лопаток. Организация трех ступеней отбора пара снижает уровень абразивного износа лопаточного аппарата и надбандажных уплотнений. Однако, во-первых, не может его полностью устранить, поскольку позволяет только частично удалить твердые частицы после 13-й и 14-й ступеней. Во-вторых, столкновение потоков пара при его вводе в ЦСД по двум патрубкам приводит к частичной потере скорости пара, что ухудшает КПД турбины. И, наконец, из-за микроколебаний расхода пара через каждый патрубок зона смешения потоков пара немного перемещается относительно оси турбины с какой-то частотой. Это приводит к микроколебаниям передней части оси турбины, которые в свою очередь могут привести к усталостным трещинам вала турбины и элементов проточной части. Но самое главное, ничего не сделано для дробления крупных абразивных частиц на мелкие. А именно крупные и вызывают наибольший износ проточной части. Абразивное воздействие наиболее сильно проявляется при первом ударе, а при повторных контактах и после дробления частиц сила удара и их воздействие на лопатку существенно уменьшаются. Природа износа, по мнению большинства исследователей, состоит в режущем и ударно-режущем действии абразивных частиц, соударяющихся с изнашиваемой поверхностью. Согласно [5] при ударе частицы о лопатку всеми реальными силами можно пренебречь, кроме силы, которая пропорциональна синусу угла падения и скорости соударения в первой степени, размеру частицы – во второй степени и корню квадратному из предела текучести материала лопатки и плотности частицы.

Все эти недостатки устраняются путем модернизации камеры паровпуска цилиндра среднего давления паровой турбины [6]. Благодаря ей организован малоударный ввод для пара и ударно-лобовой – для абразивных частиц. А так как процесс выпадения твердых частиц из пара происходит во времени после снижения его параметров ниже критических, удаление производят несколько раз, учитывая время запаздывания выпадения твер-

дых частиц. В камере паровпуска над штатным дренажным штуцером по его диаметру, параллельному оси турбины, установлена непроницаемая перегородка, делящая нижнюю часть камеры паровпуска на две равные части. Непроницаемая перегородка может быть выполнена шероховатой, а в верхней части может быть снабжена пластиной, перпендикулярной этой перегородке, причем пластина может иметь форму полуокружности. В камере паровпуска параллельно непроницаемой перегородке могут быть установлены проницаемые для частиц (например, в виде сетки, пористой пластины) перегородки, уменьшающие выход твердых частиц в поток пара. Установка непроницаемой перегородки – пластины в камере паровпуска, кроме увеличения КПД за счет уменьшения потери кинетической энергии при столкновении потоков пара и устранения микроколебаний передней части вала из-за плавного ввода пара в проточную часть ЦСД, приводит к столкновению с ней абразивных твердых частиц, чем частично разбивает их на более мелкие фрагменты, что уменьшает производимый ими эрозионный износ проточной части турбины. Таким образом, самый опасный первый удар у частиц происходит преимущественно с непроницаемой перегородкой, так как твердые частицы, имеющие немного другую траекторию пути в поле центробежных сил, чем пар, попадают прямо на нее. Особенно этот эффект возрастает при установке шероховатой пластины: частицы ударяются о пластину и уже не отскакивают от нее, а как бы прилипают к ней, «ползут» вдоль нее, при этом интенсивно истираясь. Прижимание частиц к стенке осуществляется за счет Кориолисовой силы. Поскольку происходит дробление частиц, т. е. увеличение их количества, при их определенном количестве могут образоваться их конгломераты [6]. В соответствии с [6] в движущейся двухфазной системе частицы могут находиться в двух устойчивых состояниях: либо при объемной концентрации менее 0,05, либо более 0,35. Конгломераты опускаются вдоль стенки вниз и при открытии отверстия в штатном дренажном штуцере частицы с паром выводятся из камеры паровпуска. Именно для удаления конгломератов и увеличен диаметр дренажного штуцера до 1,2–2,4 от штатного. При этом также возрастает отвод других твердых частиц. Установка перпендикулярной или Т-образной пластины снижает выход частиц из зоны их концентрации в проточную часть турбины. При придании пластине формы полуокружности увеличивается дробление и истирание частиц. При установке параллельно непроницаемой для частиц перегородке с двух сторон дополнительно проницаемых (например, в виде сетки, пористой пластины) перегородок уменьшается выход твердых частиц в поток пара, так как конгломераты и часть крупных частиц не могут пройти через сетку. А пар и мелкие одиночные частицы проходят. Модернизация позволяет повысить работоспособность и экономичность паровой турбины за счет:

- сохранения КПД турбины;
- уменьшения затрат на поддержание в работоспособном состоянии лопаточного аппарата и надбандажных уплотнений из-за снижения их абразивного износа;
- увеличения срока службы вала турбины.

Разработка, выполненная на уровне изобретения, иллюстрируется рис. 1, 2.

Цилиндр среднего давления ЦСД-1 паровой турбины Т-250/300-240 (рис. 1, 2) включает в себя расположенные в камере 1 паровпуска перегородку-экран 2 и обтекатель 3, сваренные между собой и приваренные к стенкам камеры паровпуска. Перегородка и обтекатель делят нижнюю часть камеры паровпуска на две равные полости, между которыми находится штатный дренажный штуцер 4. Штуцер соединен с входным патрубком сепаратора 5; выходной патрубок сепаратора 5 подключен через регулирующие клапаны 6, 7 и параллельно соединенный с ними запорный вентиль 8 и штуцер 9 с патрубком 10 третьего регенеративного отбора пара (пар идет на ПВД-3). Накопитель сепаратора 5, расположенный в его нижней части, подключен через запорный клапан 11 к расширителю дренажей среднего давления (РДСД) либо к другой полости пониженного давления. Для контроля давления пара в сепараторе 5 предусмотрен манометр 12 с отсечным клапаном 13. Сепаратор 5 с арматурой и трубопроводами образует первый и основной контур отвода твердых частиц из проточной части ЦСД-1.

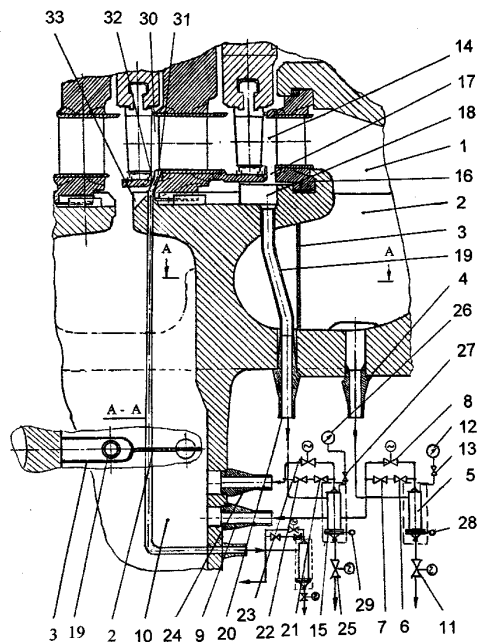


Рис. 1. Цилиндр среднего давления паровой турбины

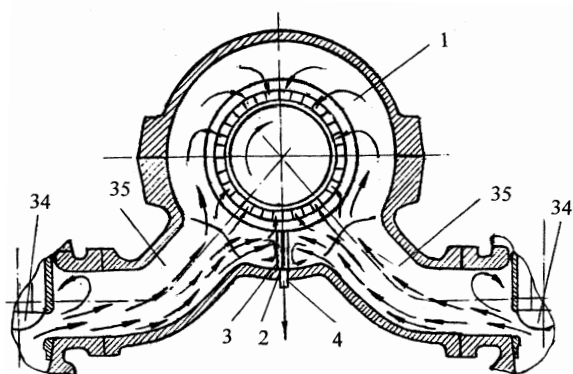


Рис. 2. Цилиндр среднего давления паровой турбины

Второй контур предназначен для отвода абразивных продуктов из межвенечного (между сопловым аппаратом и рабочим колесом) зазора 14 1-й ступени ЦСД-1 в сепаратор 15 и возврата очищенного пара в третий отбор. Состоит он из межвенечного зазора 14, направляющего аппарата 16, открытого осевого зазора 17, промежуточной камеры 18, закрытого обтекателя 3, дренажного канала 19, соединенного через штуцер 20 с сепаратором 15. Выходной патрубком сепаратора 15 через регулирующие клапаны 21, 22 и параллельно с ними запорным клапаном 23 соединен со штуцером 24 патрубком 10 третьего отбора. Накопитель сепаратора 15, расположенный в его нижней зоне, соединен через запорный клапан 25 с расширителем дренажей среднего давления либо с другой полостью пониженного давления. Для контроля давления пара в сепараторе 15 предназначен манометр 26, подсоединенный к сепаратору 15 через отсечный клапан 27.

В средней части корпусов сепараторов 5 и 15 расположены термоэлектрические преобразователи 28 и 29 типа ТХК 9419.

Третий контур предназначен для эвакуации твердых частиц из межвенечного зазора 30 2-й ступени ЦСД-1. Он образован входной камерой 31, отверстием 32, находящимся в ободу диафрагмы 2-й ступени, и каналом 33, ведущим к сепарационной установке, аналогичной двум приведенным выше.

Работа устройства происходит следующим образом. При пуске турбины открытие отсечных и регулирующих клапанов 34 сопровождается поступлением перегретого пара, содержащего абразивные продукты. Паровые потоки из подводящих патрубков 35, встречаясь с перегородкой 2, замедляют скорость и изменяют направление. Твердые частицы, имеющие немного другую траекторию пути в поле центробежных сил, чем пар, движутся в основном вдоль нижней стенки пароподводящих патрубков и попадают прямо на перегородку 2, из-за чего частично разбиваются на более мелкие фрагменты, что уменьшает производимый ими эрозионный износ проточной части турбины. Из-за потери энергии они теряют скорость и концентрируются в нижней области камеры 1 паровпуска, где находится штуцер 4. Перегородка 2 и обтекатель 3, помимо увеличения концентрации частиц в нижней области камеры паровпуска, одновременно улучшают газодинамические характеристики камеры 1 паровпуска, поскольку уменьшают потери от непосредственной встречи паровых потоков после правого и левого регулирующих клапанов.

Твердые частицы, сконцентрированные в окрестности входного отверстия штуцера 4, увлекаются паровой продувкой в сепаратор 5, где происходит отделение крупнодисперсных частиц, способных повреждать элементы проточной части, и возврат паровой фазы в патрубок третьего отбора 10. Оптимальный расход пара в продувке, определяемый как компромиссная величина между снижением мощности, ввиду байпасирования 1-й и 2-й ступеней ЦСД-1 и эффективностью эвакуации абразивных продуктов, устанавливается регулирующими клапанами 6 и 7. По мере увеличения массы твердых частиц в накопителе сепаратора 5 осуществляют сброс собранных частиц открытием запорного клапана 11 в расширитель дренажей среднего давления. Для включения режима форсированной продувки первого контура кратковременно открывают запорный клапан 8; при этом отвод из проточной части твердых частиц существенно возрастает, однако снижение экономичности ЦСД-1 может оказаться заметным. Поэтому целесообразная длительность режима форсированной продувки должна быть установлена наладочными испытаниями системы защиты. Твердые частицы, не попавшие в первый продувочный контур, транспортируются паровым потоком в межлопаточные каналы направляющего аппарата 16 1-й ступени, частично или полностью осажаясь на выпуклых поверхностях направляющих лопаток. Поскольку контакт частиц с направляющими лопатками происходит при малых скоростях и преимущественно под малыми углами, процесс повреждения металла лопаток незначителен.

Так как скорость абразивных продуктов меньше скорости парового потока, твердые частицы встречаются с рабочими лопатками 1-й ступени под большими отрицательными углами. При этом часть продукта, содержащая главным образом фрагменты меньших размеров, поступает в каналы рабочего колеса и далее движется в них, смещаясь в периферийном направлении. Другая часть частиц после удара о входные кромки рабочих лопаток отражается от них с высокой скоростью и движется, пересекая паровой поток, в сторону направляющих лопаток 2-й ступени, причиняя повреждения их выходным кромкам со стороны выпуклой поверхности.

В результате такого движения на периферии межвенечного зазора 14 концентрируется прежде всего среднедисперсная часть спектра частиц, которая через открытый зазор 17 поступает в промежуточную камеру 18, а оттуда через канал 19 и штуцер 20 в сепаратор 15, работающий аналогично сепаратору 5 первого контура. Твердые частицы, преодолевшие рабочие лопатки 1-й ступени, поступают в направляющий аппарат 2-й ступени и концентрируются в периферийной области межвенечного зазора 30, откуда удаляются через входную камеру 31, отверстие 32 и канал 33 в сепарационное устройство, аналогичное двум рассмотренным. Таким образом, снижается интенсивность повреждения периферийного зазора 2-й ступени и уменьшается потеря ее экономичности, защищается от эрозии следующая по ходу пара проточная часть турбины.

Такое решение снижения эрозии тепломеханического оборудования реализовано в устройствах, установленных на Минской ТЭЦ-4 на 4-, 5- и 6-м энергоблоках с турбиной Т-250/300-240.

## ВЫВОД



Оценим экономический эффект от экономии топлива при работе одного устройства, принимая во внимание, что без системы защиты от абразивного износа даже за первый год эксплуатации КПД ЦСД-1 снижается на 2 %, а затем продолжает уменьшаться с какой-то возрастающей скоростью. Межремонтный период для данного энергоблока составляет четыре года. Принимая, что без использования системы защиты от абразивного износа среднее ухудшение КПД ЦСД-1 за этот период составляет только 2 % (а на самом деле эта величина больше), определим уменьшение КПД всей турбоустановки в целом следующим образом.

Так как весь сработанный теплоперепад на турбине Т-250/300-240 (при разных режимах) составляет около 1500 кДж/кг, а на ЦСД-1 – примерно 350 кДж/кг, эффект от использования системы защиты от абразивного износа составит  $0,02 \cdot 350/1500 = 0,0047 = 0,47 \%$ . Если на этом энергоблоке на выработку 1 кВт·ч электрической энергии идет 0,25 кг у. т. (такие хорошие показатели достигаются за счет теплофикации, а в среднем по Беларуси этот показатель равен 0,326 кг у. т./кВт·ч), то (при работе энергоблока в среднем за 1 год 5500 ч) экономия топлива составит:  $0,0047 \cdot 0,25 \times 250000 \cdot 5500 = 1615,6$  т у. т. При цене топлива 200 дол. за 1 т у. т. это составит 323000 дол. в год.

Кроме того, оценим экономию при работе устройства от уменьшения стоимости ремонтов проточной части ЦСД-1, прежде повреждаемой абразивным износом. Ранее, без устройства, ремонт проводился один раз в четыре года. Стоимость ремонта – около 35000–45000 дол. Следовательно, снижение затрат составит еще 10000 дол. в год.

Суммарный экономический эффект составит порядка 334000 дол. в год.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Щегляев, А. В. Паровые турбины / А. В. Щегляев. – 6-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – Т. 2. – С. 337.
2. Пат. США № 6.332.323 F 01 D 1/02, 2002.
3. Пат. Японии № 3.095.734323 F 01 D 25/00, 1/02, 2001.
4. Пат. Российской Федерации RU 2.208.682 323 F 01 D 1/02, 2001.
5. Крагельский, И. В. Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбасов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
6. Цилиндр среднего давления паровой турбины: пат. 4203 Респ. Беларусь / В. П. Кашеев, В. А. Хаимов, Е. О. Воронов и др. – 2007.
7. Открытие СССР № 198 от 15 мая 1979 г.

Представлена кафедрой ТЭС

Поступила 16.03.2009

УДК 697.1:536.25

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОКЛИМАТА ОТАПЛИВАЕМЫХ ПОМЕЩЕНИЙ

Асп. ЗАХАРЕВИЧ А. Э.

*Белорусский национальный технический университет*