

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ КОНДЕНСАТОРА

**Канд. техн. наук КАЩЕЕВ В. П., инженеры ВОРОНОВ Е. О., АКУЛЬШИН В. В.,
студ. УНУКОВИЧ А. Ю., асп. КАЩЕЕВА О. В.,
докт. техн. наук СОРОКИН В. Н.**

*Белорусский национальный технический университет,
РУП «Минскэнерго»,
ОАО «ВНИИАМ» (г. Москва),
Национальная академия наук Беларуси,
Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны*

Исследование относится к энергетике, повышению эффективности работы теплообменников, в частности к технике очистки теплообменных аппаратов от отложений на внутренних поверхностях труб, прежде всего конденсаторов паровых турбин, где с одной стороны теплообменных поверхностей проходит и конденсируется отработанный в турбине пар, а с другой – охлаждающая среда (техническая вода), содержащая различные примеси, которые могут отложиться на теплообменной поверхности.

При образовании слоя отложений на внутренней поверхности труб ухудшается теплопередача от пара к охлаждающей воде и увеличиваются расходы энергии на ее прокачку из-за возрастания гидравлического сопротивления системы.

При использовании технической воды высокого качества, например конденсата или воды из озер (Нарочь), слой отложений нарастает медленно. Но при использовании обычной технической воды (без химической очистки, так как это дорого, только после грубой механической очистки и периодического хлорирования для борьбы с микроорганизмами), теплообменник нужно несколько раз в году останавливать и проводить химическое удаление отложений на внутренней поверхности трубок, как это делается, например, на Минской ТЭЦ-5, где используется обратная система технического водоснабжения с брызгательным бассейном, а подпитка производится добавочной водой из реки Свислочь. Периодическую химическую (или термическую) очистку теплообменников нужно делать при использовании в качестве технической воды морской, речной, грунтовой из скважин, при обратной системе технического водоснабжения с градирнями и т. д. Химическая очистка удаляет отложения с внутренней поверхности трубок, но при этом разрушается окисная пленка и даже растворяется часть металла трубок. Так как трубки конденсаторов латунные (также используется мельхиор, монель-металл, медно-никелевые сплавы и др.) [1] и достаточно тонкие, например на конденсаторах энергоблоков № 4, 5, 6 Минской ТЭЦ-4 толщина стенок составляет 1 мм при диаметре 24 мм, количество химических очисток до полного растворения трубок ограничено.

При использовании для охлаждения конденсаторов воды из рек для удаления отложений термическую очистку приходится применять не реже одного раза в месяц, останавливая энергоустановку [2].

Для предотвращения образования отложений или очистки от уже образовавшихся на поверхности теплообменных устройств используются различные способы [3–5], например увеличение скорости воды в части труб конденсатора. Так, известен способ очистки трубчатых теплообменников, реализованный в устройстве для промывки труб, содержащем направляющий механизм в виде решетки, закрепленной на трубной доске теплообменника и имеющей пазы спиралевидной формы с отверстиями, совпадающими с отверстиями в трубной доске [6]. В нем отложения смывают струей воды, выходящей из направляющего механизма. Недостатком данного способа очистки является невысокая эффективность (удаляются только рыхлые отложения), также устройство для реализации способа сложно в исполнении. Использовался и пневматический метод очистки труб конденсатора [3]. В этом случае в водяные камеры конденсатора подают сжатый воздух толчками (например, три впуска в минуту) или производят продолжительный и непрерывный выпуск воздуха в течение нескольких часов. Способ сложен в исполнении, к тому же в период между очистками теплообмен между средами затруднен из-за слоя отложений на внутренней поверхности труб.

Известно устройство – автоматически и долго действующий очиститель труб, состоящий из пустотелого чехла – металлических перфорированных сферической оболочки, облицовки или корпуса, которым при изготовлении придана шероховатость поверхности, и плавучего ядра из дерева или пробки, находящегося в названном выше чехле [7]. Очиститель может иметь различные размеры и форму, в том числе и сферическую. Наружная оболочка может изготавливаться из стали или другого металла. Плавучий очиститель в виде шара или другой формы помещают в очищаемый кусок водопроводной трубы и заставляют пройти через нее вместе с потоком воды. За счет сильной струи воды возникают удары шаров по внутренней поверхности трубы, благодаря чему шары производят автоматическую очистку поверхности от отложений. Для труб диаметром 20 или 23 см используются шары диаметром примерно 7,5 см, причем в очищаемую трубу помещают 12–20 шаров соответственно длине, которую следует очистить.

Недостатки этого устройства: неравномерность удаляемых отложений, высокая стоимость изготовления очищающих элементов, трудоемкость организации процесса очистки.

Также известно чистящее конденсатор устройство – комплекс с трубчатым теплообменником, состоящим из множества теплопередающих труб, имеющий систему, обеспечивающую циркуляцию жидкой среды через трубы для того, чтобы ввести твердые предметы в жидкую среду, циркулирующую через трубы для очистки последних, и агрегат (сита, экран) для выделения твердых предметов и пропуска всей жидкой среды, выходящей из системы через упомянутый агрегат (сито, экран) [8].

Твердые предметы, например шары или подобные им предметы, проносимые жидкостью через трубы, чистят от отложений внутренние поверхности этих труб. Затем агрегат отделяет их от теплоносителя, отмывает от грязи и возвращает на вход устройства.

Недостатком этого устройства являются неравномерность очистки различных частей внутренней поверхности трубы и низкое качество удаления отложений на внутренних поверхностях труб теплообменника.

Также известна технология для самоочищения поверхностей конденсаторов, в которой шарообразные тела трения попадают в трубки конденсаторов вместе с охлаждающей жидкостью и проталкиваются ею, а после прохождения последней ступени конденсатора отлавливаются улавливающей установкой, воронкообразным ситом или подобным агрегатом и направляются в трубопровод, соединяющий сливную и приточную стороны конденсатора при помощи специального насоса вместе с частью нагретой охлаждающей жидкости и устройство для исполнения этой технологии,

в которой трубопровод, соединяющий сливную и подающую стороны конденсатора, заканчивается всасывающим патрубком насоса перекачки охлаждающей жидкости, а шарообразные тела трения попадают непосредственно во впускной патрубок насоса перекачки охлаждающей жидкости конденсатора, при этом шарообразные тела трения с разнообразными трущими свойствами используются в цикле очистки одновременно [9]. В качестве материала очищающих тел используется губчатая резина. Доставленные к устройству сбора использованные загрязненные шарики промываются проходящей мимо них охлаждающей водой и чистыми возвращаются в цикл очистки.

Впервые эта технология была использована на Каширской ГРЭС (разработка ОРГРЭС в 30-е гг. XX в.), позже была применена в доработанном виде на электростанциях ГДР вернувшимися немецкими военнопленными (метод «АВЕКА»), а затем ее применили в ФРГ.

Недостатком устройства является то, что удаляются только свежие, мягкие отложения на внутренней поверхности трубок, так как легко в трубки входят только сферы, диаметр которых близок к диаметру трубки, а вход сфер большего диаметра затруднен. Но именно они могут удалить затвердевшие отложения. Поэтому перед пуском в работу конденсатора необходима предварительная тщательная очистка труб до зеркального блеска. При предварительной полировке и диаметрах шариков, близких к диаметру трубок, система может работать при малом количестве шариков (2–10 % от количества очищаемых трубок). Таким образом, способ «АВЕКА» предназначен для предотвращения образования отложений на предварительно хорошо очищенных трубах.

Также известно устройство для самоочищения труб теплообменника, имеющего множество соединенных параллельно труб, входной патрубок, который подает теплообменную жидкость к этим трубам, выпускной патрубок, связанный с названными трубами, множество очищающих элементов в теплообменной жидкости для совместной циркуляции через входной и выпускной патрубки и трубы. Очищающие элементы выполнены из упругого материала, средний удельный вес которого приблизительно равен удельному весу теплообменной жидкости, диаметр в несжатом состоянии – не меньший, чем внутренний диаметр названных труб. Движение очищающих элементов через трубы обусловлено перепадом давления между входным и выходным патрубками. Блок для улавливания очищающих эле-

ментов, расположенный в выпускном патрубке, предоставляет в то же время свободный проход теплообменной жидкости через него и тракт для непрерывной циркуляции очищающих элементов [10].

Недостатком данного устройства является низкое качество очистки, так как для удаления любых отложений требуется определенное усилие на него, а для его создания – строгое соотношение размеров очищающих элементов и трубы. Но очищающие элементы нужных для очистки размеров застревают на входе в очищаемую трубу, препятствуя проходу теплоносителя.

Эксперименты показали, что удалить отложения можно, приложив к ним определенное усилие, зависящее от состава отложения и времени жизни этого отложения.

Это можно сделать, используя в качестве шомпола при чистке оружия шарик – сжатый очищающий элемент, движущийся с потоком теплоносителя. На сечение шарика, перпендикулярное оси трубки, действует давление теплоносителя, создающее силу, толкающую его к выходу из трубки, а это усилие воздействует на слой отложений. Так как шарик тормозится слоем отложений, усилие торможения передается этому слою. Поэтому давление, воздействующее на отложения, на порядок больше перепада давлений на входе и выходе из трубки (оно равно отношению площадей сечения шарика и отложения, т. е. $-\pi d^2/4\pi d\delta$, где δ – толщина слоя отложений, или после сокращения – $d/4\delta$). Например, если $d = 22$ мм, а $\delta = 0,5$ мм, то это отношение будет равно 11.

Также известен способ очистки трубчатых теплообменников путем введения в теплоноситель упругих очищающих элементов, реализованный в устройстве для очистки трубчатых теплообменников [11]. Суть этого способа состоит в следующем: перед входом в теплообменник в теплоноситель вводят однородные по плотности и размерам упругие очищающие элементы (например, губчатые шарики) в количестве 10–15 % от числа трубок теплообменника с размерами, близкими к внутреннему диаметру трубок. Упругие очищающие элементы, проходя с теплоносителем по трубкам, удаляют с их внутренней поверхности слой загрязнений. На выходе из теплообменника упругие очищающие элементы отделяют от теплоносителя и с помощью насоса вновь вводят их в поток теплоносителя перед входом в теплообменник.

Этот способ служит для предотвращения образования отложений на предварительно хорошо очищенных трубах. К тому же он не обеспечивает достаточное качество очистки верхних и нижних рядов трубок теплообменников, в особенности теплообменников с большими размерами трубных досок, например у конденсаторов паровых турбин. Некачественная очистка верхних и нижних рядов трубок вызывается неравномерным распределением однородных очищающих тел по высоте трубной доски (их максимальная концентрация – в центре трубной доски).

Названный недостаток исправлен в способе очистки внутренних поверхностей трубок теплообменников, включающем подбор упругих очищающих элементов по размеру, близкому к внутреннему диаметру трубок, и по различным значениям плотностей в пределах 0,8–1,05 от плотности теплоносителя, ввод этих элементов в теплоноситель перед входом в теп-

лообменник и пропускание их через трубки теплообменника, при этом вводят по меньшей мере три группы упругих очищающих элементов, разных по плотности, в суммарном количестве 0,10–0,13 от числа трубок [12]. На практике это осуществляется путем введения в теплоноситель упругих очищающих элементов с размерами, близкими к внутреннему диаметру трубок. При этом в теплоноситель вводятся по меньшей мере три группы упругих очищающих элементов, в первой из которых используют упругие очищающие элементы плотностью 80–85 % от ρ в количестве 2–3 % от N , во второй – с плотностью 90–95 % от ρ в количестве 6–70 % от N , в третьей – с плотностью 100–105 % от ρ в количестве 2–3 % от N , где ρ – плотность теплоносителя; N – общее число очищаемых трубок теплообменника. В соответствии с соотношениями плотности упругие очищающие тела распределяются по трубкам по высоте трубной доски. Группа, содержащая тела наименьшей плотности (80–85 % от плотности теплоносителя), распределяется по верхним рядам трубок, а группа с телами наибольшей плотности – по нижним рядам трубок. Меньшее число упругих тел в группах с очищающими телами минимальной и максимальной плотности определяется уменьшением числа трубок в ряду с увеличением расстояния по вертикали от центра круглой трубной доски до верхнего и нижнего концов трубной доски.

Проходя по трубкам, очищающие тела удаляют с их внутренней поверхности загрязнения. На выходе из теплообменника очищающие тела отделяют от теплоносителя и вновь вводят в поток теплоносителя перед теплообменником с помощью насоса. Этот способ также служит для предотвращения образования отложений на предварительно хорошо очищенных трубах, но не обеспечивает качественную очистку предварительно плохо очищенных труб.

Кроме того, как известно, в трубчатом теплообменнике на каждой из трубок, расположенных между двумя трубными досками, перепад давлений одинаков. Поэтому расход жидкости больше в тех трубках, где сопротивление меньше (сопротивление прямо пропорционально квадрату скорости жидкости). Отсюда скорости и расходы жидкости в трубках будут такими, чтобы сопротивление трубок было одинаковым. Поэтому если в отдельных трубках возросло их сопротивление, например из-за попадания в нее очищающего элемента с диаметром, равным или большим внутреннего диаметра трубки с отложениями или образования слоя отложений, из-за чего внутренний проходной диаметр стал меньше диаметра очищающего элемента, то там уменьшается расход жидкости. И если для проталкивания шарика требуется усилие, которое больше усилия, производимого на него водой, то жидкость вообще не потечет через эту трубку (произойдет ее запирание).

Чтобы удалить прилипшие отложения, очищающим элементам нужно создать усилие, т. е. требуется перепад давлений. Это увеличивает сопротивление трубки, чем автоматически уменьшает расход жидкости. Поэтому, чтобы жидкость проходила через все трубки, в каждой из трубок должно быть не менее одного очищающего элемента, а лучше – два-пять, или их не должно быть ни одного.

В [12] только 10–13 % трубок содержат очищающие элементы, поэтому такая система работоспособна только в том случае, если перед работой была проведена тщательная очистка труб от отложений, причем до металлического блеска.

Задачей исследования является повышение качества очистки внутренней поверхности трубок трубчатых теплообменников. Рассмотрены способы очистки как от свежих, так и от уже затвердевших отложений. В результате решения данной задачи достигнут новый технический результат, заключающийся в возможности повышения эффективности и надежности работы всей энергоустановки при существенном сокращении топливных, материальных и трудовых затрат.

В первом случае данный технический результат достигается тем, что в способе очистки внутренних поверхностей трубок теплообменников, заключающемся в том, что в теплоноситель перед входом в теплообменник вводят упругие очищающие элементы и пропускают их через трубки теплообменника, закрепленные в трубных досках, причем в теплоноситель вводятся по меньшей мере три группы упругих очищающих элементов, в первой из которых используются упругие очищающие элементы с плотностью 80–85 % среды – теплоносителя, во второй – с плотностью 90–95 %, в третьей – с плотностью 100–105 %, на пристеночный подслои жидкости или на отложения на стенке создают давление, в 10–30 раз больше перепада давлений теплоносителя на входе и выходе из трубок теплообменника, путем использования упругих очищающих элементов с размерами на 2–14 % большими внутреннего диаметра очищаемых трубок. Кроме того, суммарный объем очищающих элементов в теплообменнике составляет 1,2–3,0 % от объема теплоносителя, находящегося в теплообменнике. Это гарантирует, что во всех трубках будут находиться очищающие элементы. Из-за того, что очищающие элементы имеют размеры, большие размеров входного отверстия в трубку, возникли проблемы их ввода. Для облегчения ввода шариков потребовалось сделать диаметр входного устройства большим, чем диаметр шарика. Для этого входная часть трубки представляет собой раструб – усеченный конус с образующей в форме кривой различного профиля – выпуклого, вогнутого, прямолинейного или сложной конфигурации, включающей гиперболические и параболические части, с длиной $(0,25–1,5)d$ и входным (максимальным) диаметром $D = (1,15–1,3)d$. Для легкого ввода шарика входной диаметр раструба должен быть немного большим его диаметра. Отсюда минимальный диаметр раструба $1,15d$. Максимальный диаметр ограничивается конструктивными особенностями конденсатора – плотной упаковкой его теплообменных трубок. При разряженной компоновке теплообменника входной диаметр раструба не должен быть равным или больше диаметров двух шариков (во избежание их заклинивания на входе в трубку). Такая длина раструба обеспечивает плавный вход шариков в очищаемую трубку. При меньших длинах раструба происходит резкое сжатие шарика, наблюдаются его торможение и замедление движения на входе. Это как бы на время запирает трубку и создает пульсации, микроколебания, что вредно для конструкции. При больших длинах раструба развальцовка трубок в трубной доске удорожается. Про-

филь раструба определяется конкретными условиями: возможностями развальцовки трубок в трубной доске, требованиями к их удалению при ремонтах, формой, размерами и материалом очищающих элементов, размерами и конструктивными особенностями конденсатора и т. д.

Теперь определим, почему на стенках трубок образуются отложения. Ведь при интенсивном движении теплоносителя отложения не образуются.

Вначале установим, какой режим (ламинарный или турбулентный) в трубках теплообменника при рабочих режимах его функционирования. Как известно, на практике при расчетах круглых труб используют среднее критическое (переходное от ламинарного к турбулентному режиму) число Рейнольдса, равное 2300. Область $Re = 2300-4000$ считается переходной, а при $Re \geq 10^4$ движение будет развитым турбулентным. Поэтому найдем скорость воды в трубках, при которой в нормальных условиях происходит переход от ламинарного режима к турбулентному. Расчет проведем применительно к конденсатору турбины Т-250/300-240

$$W_{\text{крит}} = Re_{\text{крит}} \nu / d_{\text{внутр}}.$$

Здесь ν – кинематическая вязкость, для воды при нормальных условиях, $\nu = 1,012 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; $d_{\text{внутр}}$ – внутренний диаметр трубки, $d_{\text{внутр}} = 0,022 \text{ м}$. Подставив вышеуказанные значения величин в формулу, получаем

$$W_{\text{крит}} = 2000 \cdot 1,012 \cdot 10^{-6} / 0,022 = 0,092 \text{ м/с}.$$

А так как скорость в трубках больше 1 м/с, режим течения – турбулентный. Согласно теории турбулентности Прандтля вблизи стенки всегда существует ламинарный подслоя, связанный с шероховатостью стенок и взаимодействием молекул теплоносителя (воды) с поверхностью трубок при его смачиваемости. Именно поэтому (для уменьшения шероховатости) в упомянутых выше работах и производили полировку до блеска внутренней поверхности трубок. Вблизи стенки в ламинарном подслое, где скорость теплоносителя приближается к нулю, и происходит осаждение частиц, взвешенных в теплоносителе, на стенках. В турбулентном потоке, как правило, такого осаждения не происходит.

Поэтому для предотвращения отложений необходимо удаление ламинарного подслоя через такой промежуток времени, за который отложения в нем на поверхности трубок не успевают затвердеть. Как показали эксперименты, достаточно производить удаление ламинарного подслоя через несколько минут. Если же отложения уже затвердели, то для их удаления необходимо применять другие способы. Оказалось, что для предотвращения образования отложений (в зависимости от качества воды) нужно, чтобы диаметр эластичного шарика был на 2–10 % больше внутреннего диаметра трубки. При меньших размерах отложения не удаляются, а при больших – возрастают требуемые усилия для проталкивания шариков, что увеличивает затраты электроэнергии на работу насоса.

Если диаметр очищающих элементов меньше чем $1,02D$, то он не будет удалять полностью ламинарный подслоя и отложения, так как сдирающее усилие, развиваемое им, недостаточно для этого. При диаметрах очищающих элементов, больших $1,14D$, возрастают затраты энергии на прокачку

жидкости, а ламинарный подслой удаляется полностью при меньших диаметрах.

Для качественной очистки верхних и нижних рядов трубок используются очистные элементы с разной плотностью. При этом в теплоноситель вводятся по меньшей мере три группы упругих очищающих элементов, в первой из которых используют упругие очищающие элементы с плотностью 80–85 % в количестве 20–23 % от M , во второй – с плотностью 90–95 % в количестве 60–54 %, в третьей – с плотностью 100–105 % в количестве 20–23 % от M , где M – общее число очищающих элементов. Как показали исследования, такие соотношения близки к оптимальным. В соответствии с соотношениями плотности упругие очищающие тела распределяются по трубкам по высоте трубной доски. Группа, содержащая тела наименьшей плотности (80–85 % от плотности теплоносителя), распределяется по верхним рядам трубок, а группа с телами наибольшей плотности – по нижним рядам трубок. Меньшее число упругих тел в группах с очищающими телами минимальной и максимальной плотности определяется уменьшением числа трубок в ряду с увеличением расстояния по вертикали от центра круглой трубной доски до верхнего и нижнего концов трубной доски.

Для того чтобы в каждой из трубок теплообменника постоянно находилось два-пять очищающих элементов, их суммарный объем должен составлять 1,2–3,0 % от объема находящейся в теплообменнике охлаждающей технической воды. При их меньшем количестве отдельные трубки оказываются без очищающих элементов, что приводит к усилению потока жидкости через них и уменьшению расхода через трубки с очищающими элементами. Система очистки перестает работать. При количестве очищающих элементов, большем 3,0 %, возрастают затраты энергии на работу насоса для прокачки жидкости, а качество очистки практически не улучшается.

Удаление ламинарного подслоя на какое-то время интенсифицирует теплопередачу от пара к охлаждающей воде, так как ламинарный подслой служит изолятором, который значительно ухудшает теплопередачу. Удаление ламинарного подслоя и отложений предотвращает стояночную коррозию (питтинг).

Предлагаемый способ очистки трубчатых теплообменников может быть реализован в установке, изображенной на рис. 1.

Установка включает в себя трубопровод 1 подвода теплоносителя, трубчатый теплообменник-конденсатор 2 с трубными досками 3, устройство 4 для отделения упругих очищающих элементов 5 от теплоносителя, струйный насос 6 для транспортировки упругих очищающих элементов, камеру загрузки 7 упругих очищающих элементов, запорные задвижки 8 и 9. В теплообменнике расположены трубки 10, которые снаружи омываются паром, а внутри по ним проходит теплоноситель – техническая вода. Установка имеет байпас 11, по которому циркулируют очищающие элементы меньшего диаметра, с блоком 12 разделения очищающих элементов по размерам, содержащий камеру 13 выгрузки очищающих элементов меньшего диаметра, оборудованный запорными задвижками 14 и 15. Так как при работе очищающие элементы истираются, т. е. уменьшается их диаметр, предусмотрена система выделения очистных элементов с раз-

мерами, меньшими требуемых для качественной очистки, и их удаления из системы.

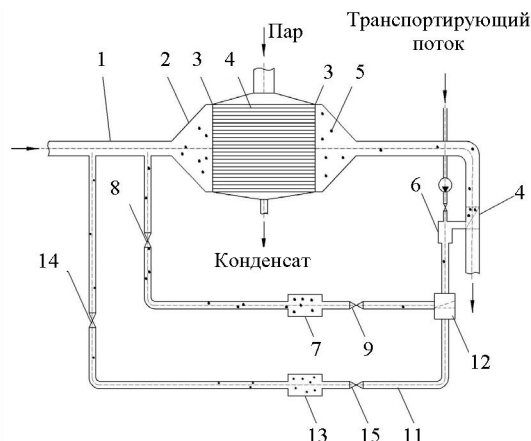


Рис. 1. Установка модернизированной шарикоочистки

Установка работает следующим образом. В камеру загрузки вводят упругие очищающие элементы, состоящие из трех групп, различающиеся по количеству и плотности очищающих элементов. Наполнение камеры загрузки ведут при закрытых задвижках. Подают воду (транспортирующий поток) на сопло струйного насоса и открывают задвижки. Очищающие элементы увлекаются потоком воды и вводятся в основной поток теплоносителя перед входом в теплообменник, на входе в который упругие очищающие элементы в соответствии с их плотностью и количеством равномерно распределяются по высоте трубной доски и, проходя внутри трубок теплообменника, очищают их внутреннюю поверхность от загрязнений. В устройстве на выходе из теплообменника очищающие элементы отделяют от теплоносителя и с помощью струйного насоса транспортируют и вновь вводят в поток теплоносителя перед входом в теплообменник. Пар, проходя через теплообменник, конденсируется, конденсат удаляется по трубопроводу. По мере образования очищающих элементов меньшего диаметра сверх требуемых количеств они удаляются из системы.

Рассмотрим второй случай, когда теплоэнергетическое оборудование, на теплообменных поверхностях которого внутри трубок были образованы отложения, некоторое время не эксплуатировалось и отложения затвердели. В этом случае, как показали исследования, необходимо использовать очищающие элементы диаметром, меньшим диаметра очищаемой трубки, и обладающие твердым покрытием. Для удаления твердых отложений на внутренней поверхности теплообменных трубок периодически осуществляют силовое воздействие на отложения внутри трубок в радиальном и осевом направлениях, при этом на внутренней поверхности трубок создают давление, в 30–50 раз превышающее давление проходящей через трубки среды – носителя очищающих элементов, введением в теплоноситель очищающих элементов с меньшими размерами (0,5–0,9 от диаметра трубок) и прочным покрытием. Для простоты берем очищающий элемент в форме шара.

Рассмотрим происходящие при этом физические процессы. После входа в трубку очищающий элемент указанных выше размеров под действием потока теплоносителя без вращения движется вдоль трубки со скоростью w . Затем появляется радиальная скорость c в направлении к стенке (первоначальный импульс происходит из-за действия гравитационных сил), а потом под действием эффекта разряжения из-за возникновения сил Бернулли. Сила, толкающая шарик к противоположной стенке с радиальной скоростью c , подобна подъемной силе крыла самолета – возникает из-за того, что в узком сечении скорость потока больше, следовательно, по закону сохранения энергии, давление меньше. Для упрощения исследования используем подход к вихревому движению, изложенный в [12–15].

При взаимодействии элемента со стенкой в точке удара элемент в радиальном направлении останавливается (скорость $c = 0$) и теряет $2/7$ доли импульса. Так как в осевом направлении элемент продолжает движение, он приобретает угловую скорость $\bar{\omega}_0$:

$$\Delta w = \frac{2}{7}w; \quad \bar{\omega}_0 d = \frac{10}{7}w,$$

где d – эквивалентный диаметр элемента; $\bar{\omega}_0$ – угловая скорость вращения элемента вокруг своей оси.

Вследствие относительно тесного расположения элементов в трубке энергия его вращательного движения $J\omega_0^2/2$, где $J = md^2/10$ – момент инерции элемента массой m , передается слою отложений на стенке в нормальном и касательном направлениях. Если форма элемента не шар, то берется средняя (наиболее вероятная по всем из декартовых координат) энергия. Касательное напряжение t в единицу времени определяется выражением

$$t = 0,77\rho_1 c^2 \tau / \eta,$$

где ρ_1 – средняя плотность материала элемента (или его покрытия); τ – относительная объемная концентрация элементов (нормированная на единицу объема теплоносителя) в очищаемой трубке ($\tau \approx 0; 05-0,1$); здесь $\eta = 1 - (\tau/\tau_0)^{1/3}$, где τ_0 – максимальная относительная концентрация элементов в трубке, $\tau_0 = 0,6$.

После первого столкновения со стенкой очищающий элемент уже движется вдоль трубки теплообменника, вращаясь, и результатом следующего удара очищающего элемента о стенку будет не только потеря нормальной и касательной составляющих импульса, но и приобретение элементом противоположно направленной угловой скорости ω_1 . Вследствие чего к силам, действующим на элемент, прибавляется поперечная сила Магнуса.

Величину этой силы можно определить следующим образом. Элемент со средним диаметром d вращается с угловой скоростью ω_1 и обтекается потоком теплоносителя со скоростью w . Вокруг движущегося элемента создается циркуляция Γ

$$\Gamma = 2\pi\bar{\omega}_1(d^2/4 - z^2),$$

где z – декартова координата, соответствующая высоте в декартовых координатах.

Поперечная сила, действующая на элемент, вычисляется по формуле Жуковского

$$dF = \rho w \Gamma dz,$$

где $\rho w \Gamma$ – сила на единицу длины диаметра.

Для полной силы F найдем

$$F = 2\rho w \int_0^{d/2} \Gamma dz = \frac{1}{3} \pi d^3 / 8 \rho \varpi_1 w = 2m \frac{\rho}{\rho_1} \varpi_1 w ,$$

где m – масса элемента.

Под действием силы Магнуса элемент осуществляет скачкообразное движение от стенки до стенки по кривой, называемой циклоидой, и увеличивает ударное взаимодействие со слоем отложений.

На практике это реализуется введением в теплоноситель наряду с традиционными очищающими элементами дополнительно новых очищающих элементов меньших размеров и имеющих более твердое покрытие. Такие элементы внутри трубы движутся по сложной траектории (вследствие силы Бернулли), периодически касаясь разных точек стенок, и при движении по трубкам периодически ударяют по внутренней поверхности стенок трубок, что приводит к усталостному разрушению отложений, а также создают силу, приложенную к отложению и направленную вдоль оси трубки (или в направлении движения теплоносителя), разрушающую и сдирающую отложения. Из-за того, что удар по отложениям производится массой очистного элемента только в точке соприкосновения (на очень небольшой площади), развиваемое от удара давление примерно в 30–50 раз превышает давление теплоносителя.

Пример расчета. Рассмотрим поведение подобного очищающего элемента в трубке теплообменника. Для упрощения задачи представим очищающее устройство в виде шара.

Задача описания всех фаз движения шара в трубке слишком сложна и неопределенна из-за возможности многочисленных вариантов, связанных с различием диаметров трубок и шаров, качеством их поверхностей, вязкостью жидкости, плотностей материала шаров и жидкости, формой шаров и изменением внутреннего профиля трубки по длине и периметру вследствие неравномерности отложений на ее внутренней поверхности и т. д. К тому же решение задачи осложняется тем, что перепад давления между входной и выходной трубными досками конденсатора общий для многочисленных трубок конденсатора, а в этих трубках из-за различных взаимодействий с ними разных шаров возникают во времени различные сопротивления, влияющие нелинейно в обратной степени на расходы и скорости теплоносителей по трубкам, а сам шар в зависимости от условий может перекрывать сечение трубки, может катиться по ее стенке без проскальзывания или же «прыгать» внутри ее по сложной траектории. Из-за пружинящих свойств шара и стенки трубки часть кинетической энергии взаимодействия сохраняется и возвращается шару, что еще более усложняет задачу определения воздействия шара на отложения.

Поэтому рассмотрим один наиболее общий и простой вариант. Очищающий элемент – шар с малыми размерами (0,5–0,9 от диаметра трубок) и прочным покрытием ударился о стенку и на мгновение остановился в радиальном направлении, как бы «прилип» к стенке, затем, так как вдоль трубки движение продолжается, шар начнет поворачиваться, чтобы катиться по стенке трубки. Момент инерции шара: $J = 0,4mr^2$, где $m = 4/3\pi r^3 \rho$. Расчеты произведем для двух временных случаев: 1) сразу после удара;

2) через некоторый промежуток времени, когда шар уже оторвался от стенки и начал, вращаясь, двигаться в потоке жидкости.

1. После удара шара о стенку трубки его скорость в точке соприкосновения равна нулю ($w_1 = 0$), а на другой по диаметру стороне скорость поверхности шара соответствует скорости невозмущенного потока ($w_2 = w_0$). Все это верно только в первый момент после удара шара. В центре шара скорость $w_3 = 1/2w_0$. Ее можно принять за среднюю вдоль оси скорость шара. При расчете учтем, что часть r/R^2 жидкости движется вслед за шаром,

т. е. со средней скоростью $w_4 = 1/2w_0$, а часть $(R^2 - r^2)/R^2$ – в зазоре между шаром и стенкой (ее скорость обозначим w_5). Здесь r – радиус шара; R – радиус трубки. С учетом закона неразрывности найдем скорость w_5 жидкости в зазоре между стенкой трубы и шаром

$$w_{\text{в зазоре}} = w_5 = w_0[1 - 1/2(r/R)^2]/[1 - (r/R)^2].$$

Используя первый закон термодинамики в виде уравнения Бернулли, с учетом, что плотность жидкости остается постоянной, получим перепад давлений Δp , толкающий шар к противоположной стенке (соответствует подъемной силе крыла самолета):

$$p_1 + w_4^2/2 = p_2 + w_5^2/2;$$

$$\Delta p = p_1 - p_2 = 1/2(w_5^2 - w_4^2) = 1/2 w_0^2 \{ [1 - 1/2(r/R)^2]^2/[1 - (r/R)^2]^2 - 1/4 \}.$$

Отсюда сила F , действующая на шар:

$$F = \pi r^2 \Delta p = \pi r^2 1/2 w_0^2 \{ [1 - 1/2(r/R)^2]^2/[1 - (r/R)^2]^2 - 1/4 \}.$$

Так как при ударе шара стенка воспринимает это усилие на небольшой площади соприкосновения, величина которой составляет небольшую долю k от площади шара (от 0,01 до 0,2 в зависимости от плотности отложений и их толщины, соотношения и геометрических размеров шара и трубки), то развиваемое при этом давление составляет значительную величину

$$p = F/k\pi r^2 = \pi r^2 \Delta p/k\pi r^2 = \Delta p/k = 1/2 \cdot 1/kw_0^2 \{ [1 - 1/2 (r/R)^2]^2/[1 - (r/R)^2]^2 - 1/4 \}.$$

В относительных единицах (нормируя на давление p_0 невозмущенного потока жидкости) имеем

$$p/p_0 = 1/p_0 \cdot 1/2 \cdot 1/kw_0^2 \{ [1 - 1/2 (r/R)^2]^2/[1 - (r/R)^2]^2 - 1/4 \}.$$

Так как шар начинает вращаться, со стороны зазора его поверхность вращается по ходу движения жидкости, ускоряя ее, а вблизи точки его последующего отрыва – в противоположную, тормозя поток жидкости. При торможении потока часть его полной энергии, а именно ее кинетическая составляющая, переходит в потенциальную, т. е. энергию давления. С противоположной стороны шара вращение шара уменьшает потенциальную составляющую общей энергии, проявляющуюся в виде давления. Благодаря этому в шаре поддерживается первоначально полученный им импульс вследствие перепада давлений до его достижения противоположной стенки.

Рассмотрим поведение шара в трубках конденсатора турбоустановки Т-250/300-240.

Скорость технической воды в реальных конденсаторах – 1,5–2,5 м/с. Диаметр (внутренний) латунных трубок – около 22 мм. Давление жидкости – около 2–3 атм.

Поэтому при скорости воды, равной 1,5 м/с, давлении 2 атм, величине $k = 0,05$ и $r/R = 0,9$, получаем $p/p_0 = 32,4$. При скорости невозмущенного потока жидкости $w_0 = 2,0$ м/с, давлении 3 атм, величине $k = 0,1$ и $r/R = 0,95$, получаем $p/p_0 = 55$.

2. Шар оторвался от стенки.

Оценим эффект вращения шара, используя уравнение Бернулли

$$p_1 + \frac{w_1^2}{2} = p_2 + \frac{w_2^2}{2}, \text{ так как } w_1 = 0; w_2 = 2w,$$

получаем

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \frac{1}{2} 4w^2 = 2w^2.$$

Отсюда сила F , действующая на шар: $F = \pi r^2 \Delta p = \pi r^2 2w^2$, развиваемое при этом давление составляет

$$p = F/k\pi r^2 = \pi r^2 \Delta p/k\pi r^2 = \Delta p/k = 2w^2/k.$$

В относительных единицах (нормируя на давление p_0 невозмущенного потока жидкости) имеем $\frac{p}{p_0} = 2 w_0^2 \frac{1}{k} \frac{1}{p_0}$.

При $w = 2$ м/с; $p_0 = 2$ атм; $k = 0,1$ получаем $p/p_0 = 40$.

Таким образом, используя разные методики для различных случаев движения шара, получаем близкие значения величин воздействия шара на отложения внутри трубки.

Исследования показали, что размеры (0,5–0,9 от диаметра трубок) очищающих элементов с более прочным покрытием, чем у элементов без покрытия с размерами, близкими внутреннему диаметру трубок, являются оптимальными для очищающего эффекта, так как элементы диаметром меньше 0,5 имеют слишком малую массу (она зависит от диаметра в кубе – $1/6\pi d^3$). Откуда давление при ударе развивается меньше требуемого для очистки, а при диаметре, большем 0,9, площадь соприкосновения шара и внутренней поверхности трубки достаточно велика, поэтому мало давление на отложение при ударе, к тому же скорость удара меньше требуемой для развития нужного давления (она определяется сопротивлением торможения шара жидкостью при его движении к противоположной стенке и зависит от площади его поперечного сечения, т. е. $\pi d^2/4$). В результате не обеспечивается нужное для очистки воздействие на отложения. Также оказалось, что указанного выше давления (в 30–50 раз превышающего давление проходящей через трубки среды – носителя очищающих элементов), периодически действующего на внутренние поверхности стенок, достаточно для предотвращения образования отложений, или, если они были образованы ранее, – для их разрушения и удаления. При меньшем давлении разрушаются не все отложения, а при большем – могут быть повреждены внутренние поверхности трубок.

На основании способа было разработано конкретное устройство, которое может очищать как свежие, так и затвердевшие отложения на внутренней поверхности труб конденсатора. Оно было внедрено и успешно ра-

ботает на энергоблоке № 5 Минской ТЭЦ-4, обеспечивает повышение качества очистки внутренней поверхности трубок теплообменника. Это понижает давление в конденсаторе, что приводит к увеличению теплосъема, сработавшего в турбине. Так, если при температуре охлаждающей воды в 20 °С без очистки отложений давление на выходе из цилиндра низкого давления турбины Т-250/300-240 и входе в конденсатор составляло 0,069 атм., а при очистке стало 0,064 атм., то увеличение сработавшего теплосъема (т. е. энергии, отданной турбине) составит 4,7 кДж/кг. В году (в межотопительный период) такие турбины работают на конденсатор примерно 0,5 года. Расход пара при этом порядка 272 кг/с. То есть изменение мощности составляет 1,28 МВт. Отсюда за 0,5 года работы экономится $1,28 \cdot 365/2 \cdot 24 \cdot 0,324 = 1816,5$ т у. т. При цене 1 т у. т. в 200 дол. это составит 363300 дол. Учитывая увеличение времени работы энергоблока из-за уменьшения его простоев благодаря самоочистке конденсатора и стоимость самой очистки (примерно 70 тыс. дол. в год), экономический эффект от внедрения устройства для очистки конденсатора одной турбины Т-250/300-240 на МТЭЦ-4 составит около 430 тыс. дол. в год. Кроме того, не нужно останавливать энергоустановку для очередной очистки конденсатора, вследствие чего экономятся материальные и трудовые ресурсы.

ВЫВОД

Достигнуто улучшение очистки внутренней поверхности трубок теплообменников, что повысило эффективность и надежность работы всей энергоустановки при существенном сокращении топливных, материальных и трудовых затрат, т. е. поставленная задача выполнена.

ЛИТЕРАТУРА

1. К и р с а н о в, И. Н. Конденсационные установки / И. Н. Кирсанов. – М.; Л.: Энергия, 1965. – 376 с.
2. К о н д е н с а ц и о н н ы е и регенеративные установки паровых турбин: сб. ст.; под ред. докт. техн. наук Л. Д. Бермана. – М.; Л.: Энергия, 1960. – 160 с.
3. S p e c k, H. Verbesserte Vakuumhaltung in Dampfkondensatoren / H. Speck // *Energietechnik*. – 1956. – № 12.
4. M u e l l e r, K. Kondensator – Reinigung mit Schwammgummikugeln / K. Mueller // *Energie*. – 1958. – Band 10. – № 8.
5. Б р о д о в, Ю. М. Конденсационные установки паровых турбин / Ю. М. Бродов, Р. З. Савельев. – М.: Энергоатомиздат, 1994.
6. А. с. 628965 СССР, Кл. В 08 В 9/00, БИ № 25, 1977.
7. United States Patent № 1.475.431, David Evans, of Burry Port, England, Nov. 27, 1923.
8. United States Patent № 1795.348, Henri F. Schmidt, Assignor to Westinghouse Electric @ Manufacturing Company, Mar. 10. 1931.
9. Deutsches Patentamt, Patentschrift № 862.456, Josef Taprogge, 11 Mai 1953, приоритет от 8 июля 1949 г.
10. United States Patent № 2.801.824, Josef Taprogge, Essen–Kupferdreh, Germany, Aug. 6, 1957.
11. А. с. 691108 СССР, Кл. F 28 G 1/12, БИ 31, 1977.
12. А. с. 1051367 СССР, Кл. F 28 G 1/12, БИ 40, 1983.
13. Л о й ц я н с к и й, Л. Г. Теоретическая механика / Л. Г. Лойцянский, А. И. Лурье. – Ч. 3: Динамика несвободной системы и теория колебаний. – М., 1933.
14. Л о й ц я н с к и й, Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – 5-е изд. – М., 1978. – С. 370, 408, 709–714.
15. Г о л ь д ш т и к, М. А. Вихревые потоки / М. А. Гольдштик. – Новосибирск: Наука, 1982. – 366 с.

16. Г о л ь д ш т и к, М. А. Вихревые процессы и явления / М. А. Гольдштик. – Пре-
принт 210–89. – Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1989. – 69 с.

Представлена кафедрой ТЭС

Поступила 30.06.2010