

Конаковская эпопея. История, которой могло не быть

Как известно, история сослагательного наклонения не имеет, но размышлять над прошедшим во избежание повторения ошибок в будущем достаточно полезно.

В январе 2015 г. исполнится 50 лет со дня пуска первого энергоблока Конаковской ГРЭС — головной советской электростанции на сверхкритические параметры рабочей среды. Их освоение в силу особенностей котла ПК-41 и топливного режима электростанции затянулось на всю «золотую» советскую пятилетку 1966 – 1970 гг.

Доводка станции до уровня проектных показателей продолжалась всю следующую пятилетку (1971 – 1975 гг.).

Этой истории, названной одним из её участников (Н. Б. Эскин, МоЖКТИ) Конаковской эпопеей, с очень большой долей вероятности могло не быть вообще.

В числе главных её причин произошло, примерно то же, что случилось с открытием явления ядерного гамма-резонанса (эффект Мёссбауэра) в шутливой оценке авторов книги «Физики шутят»¹:

— до 1958 года — могли бы неоднократно открыть, но не открыли;
— 1958 год — открыли, но не заметили;
— 1958 – 1959 годы — заметили, но не поверили;
— 1959 год — поверили, но не заинтересовались.

— 1961 год — У-у-у!

(За открытие и теоретическое обоснование явления ядерного гамма-резонанса Р. Л. Мёссбауэр была присуждена Нобелевская премия по физике).

Вскрыть причину наших бед, связанных с освоением сверхкритических параметров в электроэнергетике, можно было в конце 1965 (возможно в начале 1966) года. Но прошли мимо.

А случилось тогда следующее. В период пусконаладочных работ на втором энергоблоке директору ГРЭС К. Н. Горскому позвонил начальник главка А. М. Маринов и поручил принять делегацию японских энергетиков. В ходе знакомства со станцией делегация зашла на блочный щит управления, и один из членов делегации неожиданно задал главному инженеру В. В. Бельшеву следующий вопрос:

— Господин Бельшев, а как часто вы моете котлы?

Станция только начинала свою работу, в проектной и нормативной документации о периодичности промывок ничего не значилось, и Владислав Васильевич, ориентируясь на опыт своей работы на Черепетской ГРЭС и страны в целом, ответил:

— Примерно раз в три-четыре года.

Японца это очень сильно поразило. Он буквально побежал к главе делегации поделиться с ним этой информацией. По жестикуляции и мимике лиц, мне показалось, что руководитель делегации очень в этом усомнился, и отправил своего коллегу к Бельшеву повторить вопрос в строгом соответствии с принятой терминологией, что и было сделано:

— Господин Бельшев, Вы сказали, что периодичность химических очисток ваших котлов составляет 3 – 4 года. Я Вас правильно понял?

— Да, совершенно верно, — подтвердил Бельшев. — Периодичность химических промывок котлов у нас составляет 3 – 4 года.

Удивление японцев было запредельным, и мне тогда показалось, что у себя в Японии они столкнулись при освоении сверхкритических параметров с чем-то нам неизвестным.

В настоящее время освоение сверхкритических параметров многими авторами существенно упрощается.

Например, вот что пишет по этому поводу один из участников эпопеи И. И. Беляков (ОАО «НПО ЦКТИ») в своей статье «Проблема надёжности парообразующих поверхностей нагрева котлов. Из опыта освоения блоков СКД на электростанциях России»:

«В начальный период эксплуатации первого отечественного газомазутного двухкорпусного котла типа ПК-41, изготовленного Подольским машиностроительным заводом (ЗИО), при сжигании мазута происходили многочисленные повреждения экранных труб нижней радиационной части (НРЧ), вызванные кратковременным перегревом труб до значений, превышающих допустимые по условиям прочности металла, вследствие принятия низких массовых скоростей потока среды для их охлаждения. Прекращение подобных повреждений было достигнуто увеличением в два раза массовых скоростей потока. Значительно больше времени и усилий было затрачено на разработку мероприятий по предотвращению повреждений парообразующих труб вызванных процессами образования отложений на их внутренней поверхности».

Аналогичный подход представлен и в научно-техническом отчёте ОАО «ВТИ» по теме «Разработка котла для энергоблока на сверхкритические параметры пара (30 МПа, 600/620 °C) мощностью 660 (800) МВт для энергоэффективного производства энергии на твёрдом органическом топливе»:

«...для газомазутного котла типа ПК-41 блоков 300 МВт с высокофир-

сированной топочной камерой в вертикальных экранах нижней радиационной части были приняты низкие массовые скорости среды [незначительно превышающие 1000 кг/(м² · с)], исходя из представлений, что в зоне больших теплоёмкостей интенсифицируется внутренний теплообмен.

В результате при работе котла на маузте произошло массовое повреждение труб, в основном бокового экрана, где отмечались более высокие значения локальных тепловых потоков» (стр. 62).

На самом деле история была гораздо драматичнее, если не трагичнее.

Повреждения выходного заднего экрана НРЧ котла ПК-41 на 300 – 500 мм выше перегрева топки (рис. 1) со всеми признаками перегрева металла начались после наработки порядка 3000 часов при работе котла на газе. Это говорило о каком-то накопительном процессе.

Следов каких-либо отложений на внутренней поверхности труб, ухудшающих теплообмен, визуально не просматривалось, и причиной повреждений единодушно предположили чрезмерно высокий уровень тепловых нагрузок, падающих на выходной участок экрана с параметрами, близкими к критическим. Но в питательной воде регулярно наблюдались проскоки железа, и практически одновременно была изменена последовательность включения экранов на кotle (выходным экраном НРЧ стал боковой), а в тепловую схему блока вошла блочная обессоливающая установка (БОУ).

Не помогло. Повреждения со всеми признаками перегрева металла переместились на боковой экран (см. рис. 1). Следов загрязнения труб, также как и на заднем экране, не про-

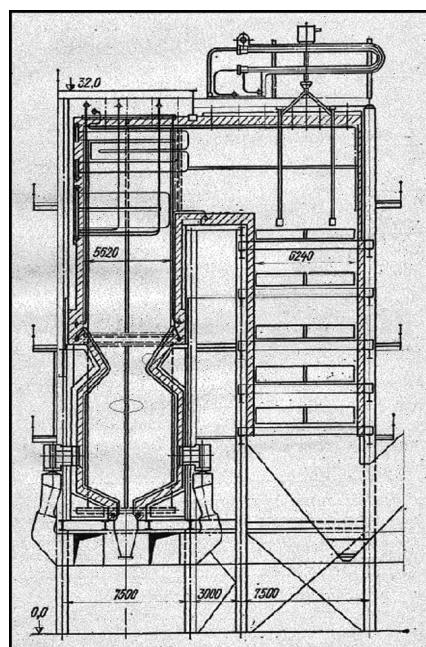


Рис. 1. Котёл ПК-41

¹ Физики шутят. — М.: Мир, 1966.

сматривалось. Не победили и железа, появляющегося в котловой воде неизвестно откуда.

Тепловые напряжения бокового экрана были несколько ниже, и причиной повреждений предположили недостаточность массовой скорости потока в выходном экране. Решением проблемы стало удвоение массовой скорости потока среды путём переделки выходного бокового, а несколько позже и заднего экранов НРЧ, в двухпоточные.

Задержка развития газовых месторождений заставила станцию перейти на использование высокосернистого (3,4 %) мазута. Тепловые напряжения топки существенно возросли, и зона повреждений расширилась — к повреждениям боковых экранов добавились повреждения заднего в том же диапазоне — на 300 – 500 мм выше перегиба. Проблема значительно усугублялась появлением в местах повреждений сильной наружной коррозии металла труб с уплотнением и попечными рисками на обогреваемой части.

Силы науки были значительно подкреплены, и исследовательские организации, соревнуясь, навязали следующий перечень реконструктивных работ, которые выполнялись в ходе планово-предупредительных ремонтов:

- алитирование наружной поверхности труб в целях предотвращения коррозии;

- торкретирование экранов НРЧ для снижения падающих на них тепловых потоков;

- рассредоточение потока рабочей среды во входные камеры заднего экрана с установкой раздатчиков;

- замена труб из стали 12Х1МФ на трубы из стали ЭИ-756;

- замена труб из стали 12Х1МФ и ЭИ-756 на трубы из стали 1Х18Н12Т;

- установка винтовых ленточных вставок в трубы боковых экранов;

- реконструкция горелочных устройств с переустройством одноярусных горелок в двухъярусные;

- утюжение массовой скорости потока рабочей среды в выходном боковом экране одного из корпусов котла четвёртого энергоблока.

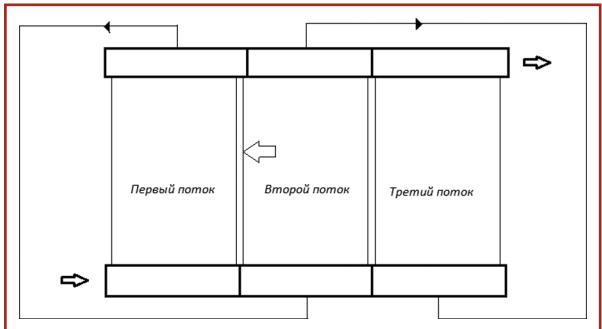
Но всё перечисленное проблемы настойчивости НРЧ не решило. Ресурс работы боковых и задних экранов НРЧ не достигал и календарного года.

Станция расширялась, объём повреждений с признаками перегрева металла катастрофически нарастал, и наработка котлов на отказ порой падала до нескольких суток.

Признаков загрязнения внутренней поверхности труб по-прежнему не просматривалось. Они выглядели, как воронёное дуло ружья, и не пачкали пальцев рук при, как говорят в медицине, пальпировании внутренней поверхности.

Нарастающая частота пусков и остановов котлов существенно усугубляла

Рис. 2. Ошибка, допущенная при утюжении массовой скорости рабочей среды в боковом экране НРЧ котла ПК-41, в результате которой крайняя труба среднего потока оказалась включённой на выходе в выходную камеру предыдущего потока



положение многих других узлов и оборудования станции. Особенно страдали сварные соединения труб конвективного пароперегревателя с выходными камерами.

Основным преимуществом прямоточных котлов, появившихся в конце 30-х годов прошлого века, всегда считалась возможность их быстрого пуска и расхолаживания. Это объяснялось отсутствием толстостенных барабанов. Их запускали и останавливали буквально за час. Это автоматически перекочевало на котлы сверхкритических параметров, где толщина стенки выходного коллектора конвективного пароперегревателя КПП и паропровода составляла 62,5 мм и была соизмерима с толщиной барабана котлов с естественной циркуляцией. Для предотвращения этих повреждений нами было решено замедлить пуски и расхолаживание блоков.

Вскоре после принятия данного решения в ходе растопки разрушилась труба бокового экрана корпуса котла, на котором была выполнена реконструкция по утюжению массовой скорости потока рабочей среды.

Труба, заменившая разрушившуюся, также не выдержала растопки. Это списали на некачественный ремонт, с предположением, что ремонтники что-то в ней уронили.

Но и следующая установленная под тройным контролем труба растопки не выдержала. Перед установкой остатки трубы сверху и снизу проверили прогонкой шара с вводом его во входную и выходную камеры, но растопки не выдержала и следующая труба.

С завода боковые экраны пришли в двухпоточном исполнении. В ходе монтажа их решили сделать трёхпоточными. Для организации третьего потока входные и выходные камеры разрезались в межтрубной зоне. В местах разреза в них вводились и обваривались тонкостенные внутренние донышки-перегородки, после чего разрезанные части сваривались.

Кто-то из нас предположил, что монтажники могли при разрезке одной из камер ошибиться на один трубный шаг, и эта труба на входе и выходе относится к двум разным потокам. Так оно и оказалось. Злосчастная труба (на рисунке помечена стрелкой) на входе относи-

лась к среднему (второму) потоку, а на выходе — к предыдущему первому (рис. 2). В связи с этим в начальный период растопки в ней возникла противоток, который останавливался нагревом содержимого с переходом в режим естественной циркуляции.

Стали размышлять о том, почему эта труба с момента ввода блока в эксплуатацию выдержала все предыдущие пуски, и пришли к заключению, что единственным изменением стало замедление растопки. На исправление ошибки требовался достаточно большой период времени, которого не было. Ресурс боковых и задних экранов НРЧ не превышал 4 – 5 тыс. ч, очереди ждал очередной котёл, наработка которого на отказ сократилась до нескольких суток, и в виде исключения мы решили рискнуть и вернуться к форсированной растопке, в ходе которой переход от противотока к прямотоку осуществлялся в очень короткий промежуток времени.

Растопка прошла успешно. Поделились информацией о возможности естественной циркуляции на сверхкритических параметрах с заводом, высказав предположение о том, что всё, сделанное в решении проблемы НРЧ, представляется излишним.

Просматривая научно-технический отчёт ОАО «ВТИ» по теме «Разработка котла для энергоблока на суперкритические параметры пара (30 МПа, 600/620 °C) мощностью 660 (800) МВт для энергоэффективного производства энергии на твёрдом органическом топливе», нашёл информацию о том, что наша находка не осталась бесследной и получила следующее развитие:

«...в гидравлических схемах мощных котлов СКД с вертикальными панелями для пылеугольных котлов с относительно низкими значениями средних массовых скоростей среды, работающих на сильно шлакующих углях (как это имело место на котлах блоков 300 МВт типа П-59) при резко неравномерном шлаковании, особенно по высоте экранных труб, в них возникал застой или недопустимо низкие массовые скорости среды, приводящие к повреждениям. Сказанное относится к частичным нагрузкам котлов.

Увеличение средних массовых скоростей при частичных нагрузках и тем самым предотвращение указанных явлений может быть достигнуто в результате организации естественной циркуляции среды» (стр. 59). Данное сообщение предваряется информацией о том, что схема естественной циркуляции при сверхкритическом давлении запатентована ВТИ и ЗИО.

Массовые повреждения экранов НРЧ и связанные с этим реконструктивные работы, тем не менее, продолжались. На последнем 8 энергоблоке в целях снижения тепловых напряжений топки под нею был установлен циклонный предтопок. Не спас положения и он.

Состояние металла настойчиво «подсказывало», что происходит какой-то накопительный процесс разрушения, но определить его причину и динамику не представлялось возможным. Температурные вставки с зачеканенными в них миниатюрными термопарами, устанавливаемые в экран, были крайне недолговечны.

Выше было упомянуто, что одним из методов борьбы с недугом НРЧ стала замена материала труб со стали 12Х1МФ на X18H12T. Ручная ремонтная сварка названных сталей считалась недопустимой, и заготовки труб из стали 1Х18Н12Т для замены производились на заводе путём наращивания их с обеих сторон патрубками из стали 12Х1МФ, присоединяемых контактно-дуговым способом.

Предположив, что стык этих сталей является термопарой, проверил предположение нагревом опытного образца в электрической печи. Сварной стык перлитной и аустенитной сталей оказался хорошей термопарой, ресурс которой стал равен ресурсу экранной трубы. На эту температурную вставку выдано авторское свидетельство № 322654 от 30.11.1971, однако, опытный образец был установлен намного раньше принятия решения о выдаче свидетельства.

Примерно через 3 – 4 месяца на этой термопаре начался рост ЭДС, и вскоре после этого произошёл разрыв одной из соседних труб.

Чистота внутренней поверхности неповреждённых труб при их визуальном осмотре и пальпировании, как и прежде, сомнений не вызывала.

Во время устранения этого повреждения вспомнились сразу две истории. Первой было воспоминание о японской делегации с вопросом «как часто моются котлы?»

Вторым — стало следующее. В 1962 году потребитель пара Красноярской ТЭЦ-1 вернул на станцию загрязнённый конденсат. На станции началось массовое повреждение топочных экранов котлов. Остановить процесс могла лишь оперативная химическая очистка котлов. На станции была разработана

простейшая технология, позволившая осуществить это в очень сжатые сроки бригадой из двух человек — слесаря и лаборанта химического цеха. На нулевой отметке котельного цеха установили бак ёмкостью, позволяющей заполнить экранную систему любого котла через её дренажные устройства. Несколько закачек с обратным сливом моющего раствора решали проблему очистки котла в течение нескольких часов. Концентрация моющего раствора определялась величиной отложений, которая находилась путём очистки наружной поверхности 100-миллиметрового участка загрязнённой трубы с последующим обжатием его в слесарных тисках и взвешиванием осадки.

После подобной операции с абсолютно чистой на вид трубой НРЧ из неё высыпалась солидная горстка мелко-дисперсного порошка, по виду напоминающему применяемый в множественных аппаратах. Весь объём осадки прилип к поднесённому магниту, из чего следовало, что это окислы железа. Первыми, кто разнес весть о находке по городам и весям стали Наум Борисович Эскин (МоЖКТИ) и Любовь Юлиановна Красякова (ЦКТИ), с которыми меня связывали дружеские отношения.

Начавшиеся химические промывки сразу же сняли проблему НРЧ, а совершенствование водно-химического режима с выходом на нейтрально-кислородный режим позволило обеспечить длительную надёжную эксплуатацию котлов.

Нейтрально-кислородный режим начал разрабатывать М. Е. Шицман (ЭНИИ им. Г. М. Кржижановского) на базе исследований К. А. Несмеяновой, сделавшей на Международном конгрессе по коррозии металлов доклад «Влияние кислорода на коррозию сталей в воде высоких параметров». (Труды Третьего международного конгресса по коррозии металлов. Т. 4. Москва, 1969 г.)

В 1983 году в издательстве «Энергатомиздат» вышла книга большого авторского коллектива «Внутритрубные образования в паровых котлах сверхкритического давления». Из списка использованной литературы (126 единиц) легко найти, что критические параметры «водили нас за нос» пять лет. Первые публикации о загрязнениях и химических промывках относятся к 1970 году.

Упрощённое отношение к проблеме их освоения, на мой взгляд, связано с непониманием физической сути критических параметров и характера выпадения отложений на внутреннюю поверхность труб в созданных ими условиях.

В течение более 5 лет мы выполнили огромнейший объём работ реконструктивного характера, не давших практически никакого результата.

Более того, некоторые из них, порождали новые неприятности. Переделка одноярусных горелок в двухъярусные, например, привела к тому, что хорошо распылённые потоки мазута, объединившись, образовали мазутный дождь на подину топки. Просочившись через неё горячие капли мазута падали на нулевую отметку, где горорали в виде небольших костров.

После каждой из перечисленных работ выпускались отчёты, обосновывающие их полезность, которой фактически не было.

Единственным исключением стала работа по рассредоточению ввода рабочей среды во входные камеры НРЧ, выполненная на одном из котлов по предложению Л. Ю. Красяковой (НПО ЦКТИ). Любовь Юлиановна после проведения испытаний признала, что её предположение о расслоении рабочей среды уже во входной камере не подтвердилось.

Тем, кто сомневается во всём вышеизложенном, приведу небольшой отрывок из введения к докторской диссертации М. Е. Шицмана по завершающей стадии освоения сверхкритических параметров (нейтрально-кислородный водный режим), успешно защищённой им в 1984 году:

«Освоение сверхкритической ступени давления проходило, как известно, с существенными трудностями. На начальном этапе надёжность работы ряда элементов оборудования оказалась на недостаточно высоком уровне.

Особенно серьёзные затруднения в эксплуатации вызвала проблема обеспечения надёжной работы экранных труб нижней радиационной части — НРЧ. В связи с этим на первых газомазутных котлах СКД ПК-41 был выполнен ряд мероприятий, охватывающих практические все предложения научно-исследовательских институтов и наладочных организаций по улучшению работы НРЧ. Из них наиболее важными были совершенствование внутрикотловых процессов и водного режима путём увеличения (удвоения) скорости среды в экранах трубах и обеспечение 100 %-ного обессоливания конденсата.

К другим мероприятиям относятся сравнительная оценка целесообразности применения в теплонапрямённых зонах НРЧ труб из высокохромистой стали ЭИ-756 и нержавеющей стали 1Х18Н12Т на основе длительных испытаний, а также разработка технологии плакирования внутренней поверхности труб из стали 12Х1МФ тонкостенной нержавеющей трубой с целью предупреждения интенсивной коррозии поверхности со стороны теплоносителя. Мероприятия по совершенствованию топочных процессов в основном касались снижения тепловых потоков. Для этой цели применялись душирующая, а затем и общая рециркуляция топочных

газов. Кроме того, при встречной компоновке горелок на фронтовой и тыловой стенах топочной камеры, принятой на всех котлах СКД, испытывались различные варианты размещения горелок: одноярусное, многоярусное, с поворотом крайних горелок в направлении к центру топки. В поисках путей обеспечения более равномерного распределения тепловых потоков по высоте топки в опытном порядке было реализовано циклонное скижание мазута (Конаковская ГРЭС, бл. 8, блоки СКД ТЭЦ-21 и ТЭЦ-23 Мосэнерго), а также установка подовых горелок (Костромская ГРЭС, бл. 8, ТЭЦ-25 Мосэнерго).

Для ослабления интенсивности наружной газовой коррозии экранных труб используются различные присадки к мазуту. На Ириклинской ГРЭС для этой цели у экранов топочной камеры котлов ПК-41 создаются паровые весы, а на Литовской ГРЭС применяются дополнительные защитные экраны. Полезность упомянутых мероприятий несомненна.

Однако они непосредственно не касались устранения основной причины снижения надёжности работы НРЧ, которая выявилась позже, в процессе длительной эксплуатации. Этой причиной было интенсивное образование в трубах НРЧ рыхлого, нетеплопроводного слоя отложений окислов железа. Повышение в связи с этим термического сопротивления от стенки к среде СКД приводило к чрезмерно высокой температуре металла труб и вследствие этого к интенсификации наружной газовой коррозии. Для борьбы с упомянутыми отложениями окислов железа в 1970 г. были введены эксплуатационные периодические кислотные промывки труб НРЧ, которые оказались достаточно эффективным мероприятием и привели к существенному уменьшению повреждаемости НРЧ. При соблюдении оптимальной цикличности проведения промывок — для мазутных котлов 2 раза в год — предотвращаются чрезмерно высокие температуры металла и снижается скорость наружной газовой коррозии до величины, обеспечивающей безаварийную эксплуатацию НРЧ в межремонтный период и проведение профилактической замены прокорродированных труб только один раз в 3–4 года при капитальных ремонтах.

Эксплуатационные кислотные промывки являются обязательной операцией и на зарубежных котлах СКД. В США, Японии, ФРГ вопросам совершенствования промывок, установления оптимального времени вывода котлов на эту операцию и её экологическим аспектам уделяется большое внимание. Опыт совершенствования как конструкции, так и эксплуатации котлов СКД убедительно свидетельствует о том, что радикальное решение проблемы

надёжности НРЧ связано прежде всего с предотвращением интенсивного образования внутренних отложений.

Причины образования отложений и изыскание путей снижения темпа их роста до последнего времени рассматривались в основном исходя из представления о наносном механизме образования отложений. Поэтому в качестве критерия для оценки эффективности водного режима, естественно, принимался уровень выноса продуктов коррозии конструкционных материалов — стали и латуни — в питательную воду. С этих позиций было бы оправданным повышение pH питательной воды при традиционном гидразинно-аммиачном водном режиме. Однако зарубежный опыт глубокого амминирования ($\text{pH} = 9,6 \div 9,7$) свидетельствует о том, что снижение выноса железа с питательной водой не оказывает решающего влияния на темп образования внутренних отложений в теплоизоляционных трубах НРЧ, и что глубокое амминирование существенно не сказывается на повышении надёжности и упрощении эксплуатации».

В заключение этой темы несколько слов о физической сути критических параметров.

Из института я вышел с пониманием их как кратковременного равновесного состояния между водой и паром. Их прохождение в кotle ПК-41 должно было осуществляться в переходной зоне, вынесенной в конвективный газоход. Когда стало ясно, что это происходит несколько раньше, попытался разобраться в их физической сути путём расспросов представителей научно-исследовательских организаций, но ничего нового не получил. Смысл ответов на мои вопросы сводился к тому, что «критические параметры — это состояние, когда вода уже не вода, а пар ещё не пар».

Однажды во время ремонта переходной зоны, связанного с дефектом заводской сварки, один из членов ремонтной бригады задал мне вопрос о сути критических параметров. Я ответил примерно тем же, и мне почему-то стало очень неудобно.

Решил разобраться, и, перерыв учебники физики, в двухтомнике «Основы физики» Б. М. Яворского и А. А. Пинского, предназначенного для учащихся школ с углублённым изучением физико-математических дисциплин и подготовки к конкурсным экзаменам в вузы, нашёл следующее.

Каждому веществу соответствует вполне определённый характер упаковки молекул. Для твёрдых тел характерен дальний порядок, когда взаимодействие молекул распространяется на сотни и тысячи молекулярных слоёв. Для жидкостей характерен ближний порядок, где взаимодействие молекул распространяется всего на несколько

слоёв. Дж. Д. Бернал предположил, что для текущих жидкостей, способных к растворению многих веществ, характерен пятый порядок, где в плоскости взаимодействуют пять, а в объёме одиннадцать молекул. Правильными пятиугольниками и состоящими из них многогранниками заполнить плоскость и объём невозможно, и в жидкости должны быть свободные пустоты, которые советский физик Я. И. Френкель назвал «дырками».

В 1861 году Д. И. Менделеев предположил, что для жидкости должны существовать параметры, при которых она переходит в пар во всём объёме одновременно. Визуально эти параметры наблюдал другой наш соотечественник М. П. Авенариус.

Поместив в герметичный сосуд определённое количество эфира и нагрев его, он наблюдал следующую картину. При нагреве уровень жидкости, несмотря на её непрерывное испарение, в силу теплового расширения непрерывно рос, а в какой-то момент весь сосуд неожиданно заполнился плотным туманом, который вскоре рассеялся без каких-либо признаков уровня.

Затуманивание всего объёма сосуда стало следствием того, что нагрев с ростом температуры и давления в жидкостном объёме увеличивал амплитуду колебания молекул в их связках, а в объёме пара растущее давление наоборот сокращало амплитуду колебаний, сближая их к уровню возникновения связей, свойственных жидкости. Момент равновесного состояния жидкости и пара, характеризующийся тем, что из-за флуктуаций плотности во всём объёме образуются и мгновенно исчезают микроскопические капельки жидкости, рассеивающие свет, и является критической точкой, названной Менделеевым температурой абсолютного кипения.

Это я узнал где-то в 1966 году, и в принципе уже тогда можно было задуматься о поведении содержимого дырок. Примеси железа в виде заряженных ионов, получившие в этих условиях полную свободу, должны равномерно расположиться на внутренней поверхности металлической трубы. Однажды, обсуждая с Н. Б. Эскиным возможные результаты внутритрубной ионизации среды в НРЧ, очень близко подошли к пониманию этого, но рассуждая о зарядах, которые должны уйти на наружную поверхность трубы, почему-то обосobili их от носителей, для которых металл трубы является препятствием.

Следует отметить, что в свете современных знаний, впервые сверхкритическое состояние вещества обнаружил француз Каньяр де Латур, исследовавший акустические явления. В 1822 году он, поместив в загерметизированный пушечный ствол, наполовину заполненный спиртом кремниевый шар, стал

нагревать его с периодическими наклонами и прислушиваться к звуку перемещающихся жидкости и шара. Он слышал вслеск, возникавший, когда шар преодолевал границу раздела фаз, но в определённый момент шар резко ускорялся с изменением характера звука. У экспериментатора сложилось впечатление, что жидкость полностью исчезла. Для каждой жидкости это происходило при строго определённой температуре, которую стали именовать точкой де Латура. В двух опубликованных им статьях описаны его эксперименты по нагреванию спиртов в герметизированных стеклянных трубах. Он наблюдал увеличение объёма жидкости и исчезновение уровня, а при охлаждении видел образование плотного непрозрачного облака. Кроме того, он установил, что выше определённой температуры увеличение давления не приводит к образованию жидкости.

В свете изложенного, мне кажется, что если бы мы были чуточку грамотнее и внимательнее, история НРЧ кончилась бы, не начинаясь.

* * *

Примерно такое же положение сложилось с освоением в качестве топлива высокосернистого мазута на электростанциях со сверхкритическими параметрами.

Качество мазута на всех уровнях тогда оценивалось только содержанием серы.

Восьмая пятилетка в электроэнергетике — это ежегодный ввод в эксплуатацию порядка 10 млн кВт мощностей, которыми в теплозергетике были в основном газомазутные энергоблоки СКД. В связи с задержкой освоения газовых месторождений, они были вынуждены работать на мазуте.

Переход Конаковской ГРЭС на высокосернистый мазут вызвал сильную коррозию металла топочных экранов НРЧ. Несмотря на мизерную зольность мазута, серьёзной проблемой стало и шлакование поверхностей нагрева. Особенно это проявилось, когда в целях предотвращения коррозии были заторкетированы экраны НРЧ. Значительная часть тепла топки в связи с этим переместилась в конвективную шахту, и КПП буквально залило стекловидным расплавом шлака.

Исследование мазутных проблем сопровождалось массой новых «открытий».

Через три года после пуска Конаковской ГРЭС в 1968 году запустили Кармановскую ГРЭС. На ней были установлены те же котлы, что и на Конаковской, и вскоре для конаковских энергетиков наступили тяжёлые времена. Кармановцы превосходили конаковцев по всем параметрам. Там практически не было коррозии НРЧ, набивки РВП и газоходов, шлакования и многих других неприятностей. И конаковцев

стали критиковать, приводя в пример кармановцев.

— Вы посмотрите, — говорило нам высокое начальство, — Всё у вас одинаково, а результаты — небо и земля. Если так пойдёт и дальше, придётся вас разогнать.

Говорилось это достаточно беззлобно, но нам было очень обидно. Однако против очевидного не попрёшь. Результаты действительно были разными.

И вот однажды в морозные декабрьские дни мы отправились за опытом к кармановцам. Подъезжая к электростанции, поразились тем, что металлические газоходы не имеют изоляции, но при этом нигде не «газят». Для наших газоходов нарушение изоляции съедало оголившийся участок буквально за месяц.

Во время нашего посещения станции в текущем ремонте находился один из котлов, и мы с начальником котлотурбинного цеха, переодевшись в рабочие спецовки, осмотрели всё не только снаружи, но и изнутри.

Влезли в топку. Чистота и порядок. Облизали всю конвективную шахту котла. Чисто, как в крестьянской избе справного хозяина. Залезли в регенеративный воздухоподогреватель (РВП). Конаковские воздухоподогреватели на остановленных котлах зимой всегда покрывались кислой зелёной слизью, а здесь — всё в порядке.

Чистоту нам объяснили вводом присадки. Мы это пробовали и знали, что присадки всего лишь изменяют характер отложений, несколько увеличив их количество. Мы удивлялись, но крыть было нечем.

— А какой у вас мазут? Сколько в нём серы? — поинтересовались мы.

— Как и у вас 3,4 %, — отвечали нам, и мы удивлялись ещё больше. Мазут в СССР делился на высокосернистый и низкосернистый. Никакие другие показатели в расчёт не принимались. Взяв на всякий случай несколько накладных на кармановский мазут, мы в полном недоумении поплелись вовсю.

По приезде в Москву разошлись по своим делам. Меня ангел хранитель направил в «Дом книги» на Новом Арбате, где в разделе «теплоэнергетика» моё внимание привлекла небольшая хорошо оформленная книжка с переводами ряда статей по проблемам зарубежной промышленной энергетики. Одну из них, сопровождавшую фотографиями вида «до» и «после», прочёл прямо в магазине. Она раскрывала тайну величия Кармановской ГРЭС.

Суть статьи была примерно следующей. Судовые паровые котлы в силу малых габаритов имеют очень высокий уровень тепловых напряжений топочного объёма и при работе на сернистом мазуте их поверхности нагрева подвержены сильной коррозии и шлакованию. На фотографиях их вид в части корро-

зии и шлакования буквально повторял конаковские котлы.

— Но сера здесь, — говорилось далее, — совершенно не причём. Все зло в натрии, вводимом в процесс переработки нефти для увеличения доли выхода мазута. Он является катализатором многих процессов, происходящих при сжигании мазута, и главным зообразующим элементом. Если натрий убрать, то шлакование и коррозия поверхностей нагрева немедленно прекратятся. Это тоже подтверждалось фотографиями, очень напоминающими виды Кармановской ГРЭС.

Процесс удаления натрия был примитивно прост. В воде натрий растворяется лучше, чем в мазуте, и последний нужно просто промыть водой — ввести в мазут воду, перемешать, а потом отсеять на центрифуге.

По возвращению в родные пенаты сравнили привезённые кармановские накладные на мазут с конаковскими. Они во всём были одинаковы, за исключением зольности. Зольность кармановского мазута была обозначена цифрой 0,02 %, а конаковского — 0,15 %.

Мизерность для энергетики того и другого позволяла не обращать внимания на почти 8-кратную разницу в зольности, однако в свете изложенного выше, это заставило взглянуть на проблему совершенно иначе. Дома решил пополнить полученные знания о натрии сведениями из Детской энциклопедии и вузовского учебника «Общая химия». Открытия ожидали и здесь.

Детская энциклопедия (М., 1963) поведала о том, что в 1806 году французского учёного — профессора прикладной химии Н. Клемана и фабриканта Ш. Дезорма заинтересовал процесс производства серной кислоты. В то время её получали путём сжигания серы. Но без добавки селитры процесс не шёл. Вместо серного ангидрида без селитры возникал только сернистый. Исследования процесса показали, что сжигание селитры даёт окислы азота, которые являются катализатором по переводу сернистого ангидрида в серный. Работа названных учёных по существу положила начало широкого использования каталитических реакций в химической промышленности.

«Общая химия» Н. Л. Глинки добавила к этому то, что натрий является промотором катализатора для этого процесса.

Следует отметить, что в настоящее время в качестве катализатора используется пятиокись ванадия, о значении которой в нашей истории будет сказано несколько ниже.

Появившаяся с переходом на мазут коррозия требовала выявления её причин и механизма действия, и здесь мнения науки в значительной мере разделились. Одни, обнаружив в золе пя-

тиоксис ванадия, считали, что виной всему ванадий, и называли коррозию ванадиевой. Другие отдавали предпочтение сере, и коррозию называли сернистой. Третьи считали, что возможно и то, и другое.

Первые объясняли механизм коррозии так: «Ванадий находится в топливе в связанном состоянии в виде сложных органических комплексов. При сгорании происходит разрушение комплекса и окисление ванадия до высшего окисла V_2O_5 (пятиокись ванадия), температура плавления которого около 650 – 675 °C. Пятиокись ванадия является активным соединением, способным окислять металлы, например железо, отдавая свой кислород и восстанавливаясь при этом до трёхокиси. Полученная таким образом трёхокись ванадия вновь окисляется избытком кислорода воздуха до пятиокиси и т.д. Для процесса высокотемпературной коррозии помимо ванадия существенное значение имеет содержания натрия в составе минеральной части тяжёлого топлива. Образующиеся при сгорании топлива окислы ванадия и натрия дают соединения типа $Na_2O \cdot V_2O_5$, которые способны вызывать сильную коррозию горячих поверхностей двигателя. При высоких температурах коррозийная агрессивность соединений $Na_2O \cdot V_2O_5$ различного состава неодинакова. В известных соотношениях Na_2O и V_2O_5 коррозийная агрессивность соединений натрия и ванадия может быть выше, чем для чистой пятиокиси ванадия. Например, соединение состава $Na_2O - 3V_2O_5$ даёт максимум коррозии. Исследования показали, что на коррозийную агрессивность соединений ванадия и натрия очень большое влияние оказывает соотношение между содержанием этих элементов. Из опыта найдено, что отношение содержания натрия к содержанию ванадия не должно превышать 3:10, в противном случае скорость коррозии значительно возрастает. Причина важности соотношения натрий — ванадий в составе минеральной части топлива заключается в способности Na_2O и V_2O_5 образовывать соли ванадия переменного состава, обладающие различной температурой плавления».

Другая позиция сводилась к следующему: «Три основных вида высокотемпературной коррозии имеют различный химический характер: окисление в газообразной фазе, натриево-ванадиевая коррозия при работе котла на мазуте и коррозия под воздействием отложений на поверхностях нагрева. Общим условием возникновения газовой высокотемпературной коррозии является омывание экранных труб продуктами неполного сгорания при отсутствии кислорода. При этих условиях в восстановительной среде продуктов сгорания образуется H_2S , который играет роль основного коррозионного

агента (сульфидная коррозия). Снижение концентрации H_2S (ниже 0,01 %), а также восстановительной способности топочных газов резко снижает скорость коррозии. Снижение температуры топочных газов в пристенной области уменьшает вероятность протекания реакций топочных газов с оксидной плёнкой, снижает скорость диффузии топочных газов через отложения, уменьшает глубину их проникновения в отложения. Максимум кривой скорости коррозии наблюдаются при температуре стенки около 550 °C. Появление в пристенной зоне продуктов неполного сгорания при отсутствии кислорода вызывается неравномерным распределением воздуха между горелками, неравномерной по времени подачей топлива в горелки, большими присосами воздуха в топке, подачей сбросного воздуха выше основного ядра горения, недостатками аэродинамики топки, приводящими к набросу факела на экраны. Основные мероприятия по снижению скорости высокотемпературной сульфидной коррозии должны быть направлены на усовершенствование топочного процесса. По данным ВТИ, для защиты от коррозии представляет интерес нанесение на трубы защитного покрытия с целью создания прочной плёнки с малой скоростью диффузии, например покрытий на основе Al, Cr, Si, Mg, Ti. Покрытия должны быть достаточно плотными, иначе их функции не будут выполнены. При сжигании мазута экраны НРЧ могут быть подвержены сульфидной коррозии в большей мере из-за существенного роста тепловой нагрузки топочных экранов. Мероприятия по предупреждению сульфидной коррозии аналогичны изложенным выше, однако в части организации топочного процесса они легче осуществимы. Для мощных котлов необходимо: многоярусное расположение горелок с умеренным теплонаружением попечного сечения топочной камеры (не более 3,5 МВт/м² на один ярус горелок), снабжение парового котла устройствами для внутренней промывки НРЧ от отложений и совершенствование системы водоподготовки. Рециркуляция топочных газов приводит к снижению температуры стенки, но концентрация H_2S и скорость коррозии экранов снижаются в малой степени. Действие присадок на основе $MgCl_2$ не обеспечивает полного прекращения коррозии НРЧ. Создание паровой завесы вблизи труб НРЧ защищает их от воздействия коррозионно-активных компонентов топочных газов и препятствует повышению температуры труб. Эффективность зависит от способа ввода пара, конструкции паровых аппаратов и места их установки».

Из изложенного со всей очевидностью вытекает, виной всему — окислы азота и пятиокись ванадия, являю-

щиеся катализаторами по переводу сернистого ангидрида в серный, и их промотор натрий.

Ознакомление руководства главка и министерства с нашими находками позволило реабилитироваться, а дальнейшее развитие темы выглядело так.

С начальником топливно-транспортного цеха станции поехали к специалистам по химическому машиностроению поговорить о центрифугах для сепарации.

— Ребята, — сказали нам там, — не ссыпьте соль на рану. Вы не первые, кто заинтересовался этой проблемой. Первыми были военные моряки. Они надавили на нас через ЦК, и мы купили пару центрифуг, но у нас ничего не получилось. При сепарации они моментально замылились. Мы — рекламацию, а нас в ответ осмеяли, показав, что для процесса нужен деэмульсатор, а это у них стратегический материал и нам его не дали, а мы сами получить его пока не можем.

Продолжили сами. Наши опыты по разогреву водомазутной эмульсии в электрической печи показали, что при определённой температуре вода с растворённым натрием осаждается достаточно быстро, но этими опытами мы лишь определили количество вымытого из мазута натрия, который в связи с отсутствием системы его утилизации пришлось сжечь вместе с мазутом. Наращивание доли газа и множество других задач превратили проблему в ряд неактуальных. Количество сжигаемого мазута сократилось практически до нуля.

* * *

Немаловажной оказалась и проблема энергетической эффективности мазута. При всех бедах, использование мазута вместо газа почти на процент повышало эффективность работы электростанции. Выполненная по заказу станции работа «пояснила», что в условиях сверхвысоких тепловых нагрузок вода, содержащаяся в мазуте, в присутствии какого-то катализатора разлагается на кислород и водород, которые воссоединяясь дают дополнительное количество тепла.

Мы смирились, а через 7 лет выяснилось, что никакой науки здесь не требовалось. На деле оказалось, что вся проблема в учёте. Уровень мазута в цистернах замерялся штангой с точным математическим расчётом объёма, а объём газа — расходомером газовиков с погрешностью в пользу поставщика. Выяснилось это, когда ГРЭС купила и установила свой счётчик газа.

Но это уже история другого плана.

Э. Н. ШАВРОВ
член редколлегии журнала
«Энергетик», Москва
shavred@mail.ru