

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ С ВНУТРИТРУБНЫМИ ОТЛОЖЕНИЯМИ

В.А. Татаринцев

Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Россия

Статья посвящена исследованию влияния накипеобразования на эффективность работы теплообменных аппаратов применительно к конденсаторам паровых турбин, пароводяным подогревателям и бойлерам котельных установок. Цель исследования состояла в получении рекомендаций по повышению эффективности конденсаторов паротурбинных установок (ПТУ), для чего изучались химико-физические свойства слоя неорганических отложений и их структуры; были получены зависимости для расчета термического сопротивления слоя отложений на поверхностях гладких и профилированных труб; проведен анализ разнообразных способов очистки поверхностей и были разработаны рекомендации по периодичности чистки конденсаторов. Описаны результаты физико-химического анализа неорганических солеотложений. Термическое сопротивление отложений определялось по толщине слоя накипи и ее коэффициенту теплопроводности. Толщина слоя измерялась на шлифах микроскопом и профилографом-профилометром. Получена зависимость, устанавливающая взаимосвязь между интенсивностью солеотложений и основными определяющими процесс факторами: скоростью воды, ее средней температурой и жесткостью, геометрией канала, продолжительностью работы; на ее основе возможно прогнозирование снижения тепловой нагрузки теплообменника в эксплуатации. Получена зависимость влияния температуры теплоносителя и пористости накипи на теплопроводность. Показано, что в профилированных трубках интенсивность солеотложений ниже, чем в гладких. С уменьшением относительной глубины и шага накатки наблюдается рост неорганических отложений. Высота выступов накатки оказывает большее влияние, чем шаг между ними. Разработаны рекомендации к расчету относительной загрязняемости гладких и винтообразно профилированных трубок. Применение профилированных трубок вместо гладких в энергетических установках является эффективным средством повышения экономичности энергооборудования. Рассмотрены различные способы очистки поверхностей. Предложена методика оптимизации и выполнено технико-экономическое обоснование периодичности чисток теплообменных аппаратов. Для различного календарного времени начала эксплуатации теплообменника получены рациональные сроки проведения чисток.

Ключевые слова: теплообменные аппараты, профилированные трубки, накипеобразование, эффективность работы.

Введение

На технико-экономические показатели теплоэнергетических установок оказывает влияние вспомогательное оборудование, эффективность которого в значительной степени зависит от совершенства теплообменных аппаратов [1, 2]. Одним из важнейших показателей надежной работы энергооборудования является состояние поверхности теплообмена, значительно меняющееся в процессе эксплуатации из-за накипеобразования. Изучению этого процесса посвящен ряд работ отечественных и зарубежных авторов.

В исследованиях Н.В. Телина [3] рассмотрен традиционный подход к оценке процесса образования накипи на поверхностях теплообмена, однако изучается накипеобразование только для гладких труб, не привлекая нашего внимания к современным профилированным поверхностям в отличие от [4, 5]. А.М. Зимняков, Р.В. Наумов [6] рассматривают различные способы чистки поверхно-

стей, часть из которых, как указывают авторы, к сожалению, приводят к интенсификации коррозии. В статье дается глубокий анализ качественного и количественного состава накипи. Д.В. Фесак, А.А. Литвиненко [7] для уменьшения образования накипи рекомендуют увеличивать скорость движения теплоносителя, что не всегда возможно. Кроме того, они предлагают увеличивать диаметр трубок, что, несомненно, ведет к снижению коэффициента теплопередачи. В статье В.А. Галковского, М.В. Чуповой [8] констатируется тот факт, что основные теплотехнические характеристики зависят от образования накипи, например, коэффициент теплопередачи снижается при увеличении толщины слоя накипи.

А.И. Леонтьев [9] рассматривает различные интенсификаторы теплообмена: оребрение, спирально накатанные, сферические трубы, кольцевые выступы и т. д. Он утверждает, что применение генераторов вихрей эффективно в работе теплооб-

менных аппаратов. Авторы под руководством Ю.М. Бродова [10] рассматривают основные характеристики, конструкции, методы расчета, анализируют режимы работы конденсаторов, подогревателей сетевой воды по совершенствованию теплообменников с витыми трубами. Ими же в работе [11] исследованы особенности течения и теплообмена масла в гладких и профилированных трубах. Полученные зависимости для расчета теплообмена позволяют установить эффективность интенсификации в профилированных трубах примерно на 7 %. В работах рассматривается влияние отдельных параметров вне их совокупности [12]. В результате рассмотрения литературных источников установлено, что определяющими параметрами, влияющими на отложение солей, являются скорость, температура и жесткость охлаждающей воды, шероховатость поверхности, геометрия канала, длительность работы аппарата. К недостаткам работ по этому вопросу следует отнести выбор целевой функции оптимизации.

Отсутствие необходимых данных о влиянии накипеобразования на работу теплообменников, о физико-механических свойствах накипи, а также зависимостей толщины отложений во времени, свойств теплоносителя и режимных факторов не дает возможности учитывать изменение эффективности теплообменников в процессе эксплуатации.

Цель исследования состоит в получении рекомендаций по повышению эффективности конденсаторов ПТУ. Для этого решались следующие задачи:

- изучение химико-физических свойств слоя неорганических отложений и их структуры;
- получение зависимостей для расчета термического сопротивления слоя отложений на поверхностях гладких и профилированных труб;
- проведение анализа разнообразных способов очистки поверхностей и разработка рекомендаций по периодичности чистки конденсаторов.

Научная новизна

Проведенное исследование отложений показало, что окись кальция составляет 40–42 %, органические вещества – около 50 %, окись магния – менее 2 %, окись железа – 6–9 %, кремний – менее 2 %. Идентичность состава отложений делает возможным сопоставление результатов исследований по образованию накипи на поверхности теплообменных аппаратов, испытанных в различных условиях.

Структура отложений представляет собой неоднородную систему, основой которой является плотный слой частиц солей размером до 15 мкм. Для наружного подслоя характерны рыхлые пористые образования со средней величиной граней 2–5 мкм. Неоднородность накипи объясняется тем, что поток жидкости легко сносит мелкие образования солевых компонентов наружного слоя, в то время как на поверхности трубки процесс кристаллизации идет более продолжительное время и отдельные частицы солей достигают значительных размеров. На рис. 1 показана структура слоя накипи в обратно-рассеянных электронах в пристенном и наружном слоях.

Существование двух слоев накипи является косвенным доказательством того, что образование отложений представляет собой сложносоставной процесс. Кристаллизация зарождается на микронеровностях поверхности металла, которые выполняют роль центров образования отложений. По мере удаления от металла процесс солеотложения происходит в основном за счет оседания взвешенных в жидкости твердых частиц на первичный слой кристаллов. Такое разделение слоев носит условный характер, так как между ними не существует четкой границы.

Термическое сопротивление отложений в значительной степени определяется их теплопроводностью. Экспериментально исследовался коэффициент теплопроводности сухой и влажной низко-



а)



б)

Рис. 1. Структура слоя накипи в обратно-рассеянных электронах: а – пристенный слой; б – наружный слой

температурной накипи. Получено, что при температурах охлаждающей воды (5–30 °С), используемой в бойлерах и конденсаторах ПТУ, коэффициент теплопроводности изменяется в пределах 1,4–1,8 Вт/м·°С. Отложения из оборотной воды обладают неодинаковыми по величине коэффициентами теплопроводности из-за различных соотношений пористости и влажности.

Наиболее значительное влияние на термическое сопротивление слоя, а также коэффициент теплопередачи оказывает пористость слоя накипи (в опытах изменялась от 40 до 70 %). С ростом температуры потока пористость отложений увеличивается, так как усиливается конвекция частиц, которые, хаотически двигаясь, способствуют образованию рыхлой и менее прочной структуры отложений. Обобщением опытных данных получена зависимость влияния температуры теплоносителя t и пористости накипи Π на теплопроводность.

Вывод. Идентифицированы определяющие процесс накипобразования параметры и установ-

лено качественное и количественное их влияние на эффективность теплообмена в конденсаторах.

Практическая часть. Влияние на теплообмен накипобразования на внутренней поверхности трубок изучалось на экспериментальном стенде лаборатории теплообменных аппаратов Брянского государственного технического университета (БГТУ) и на пароводяном подогревателе, установленном на ТЭЦ г. Брянска (рис. 2 и 3).

Полученные на экспериментальных установках данные анализировались в виде зависимости изменения интенсивности солеотложений от основных физических параметров процесса: скорости воды W , ее средней температуры t , жесткости G , геометрии канала d^{-1} и продолжительности работы установки τ . В опытах установлено, что интенсивность накипобразования различна по длине трубок, увеличиваясь от входа к выходу, а с увеличением диаметра трубки она снижается. Стабильное увеличение количества накипи по длине трубки наблюдается при различных температурах, скоро-

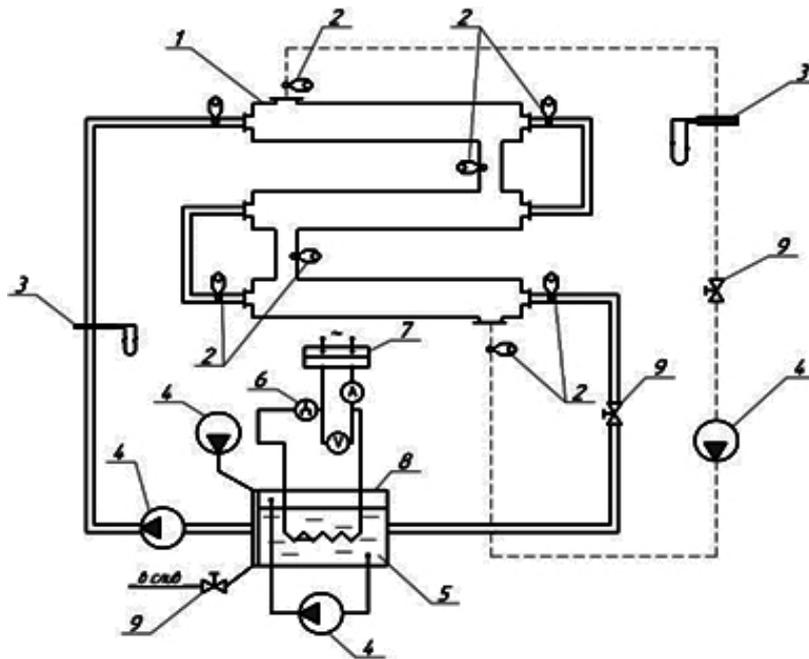


Рис. 2. Принципиальная схема экспериментальной установки: 1 – экспериментальный участок; 2 – термодатчики; 3 – расходомерные устройства; 4 – насосы; 5 – водоводяной теплообменник; 6 – блок термостатирования; 7 – автотрансформатор; 8 – электронагреватели; 9 – вентили

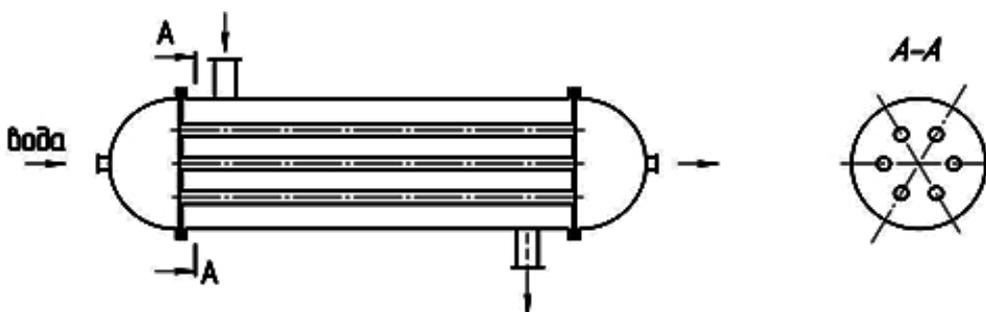


Рис. 3. Схема пароводяного экспериментального участка

стях и солесодержаниях теплоносителя в виде зависимости интенсивности накипеобразования, которая пропорциональна геометрическому параметру $d^{-0,25}$. На начальном участке трубы турбулизация потока наибольшая, и частицы солей, находящихся в потоке, обладают меньшей возможностью к сцеплению и удержанию поверхностью трубы. По мере движения поток стабилизируется и турбулентное ядро смещается к оси канала. При этом в ламинарном пограничном слое идет процесс переноса образующихся в растворе микрочастиц к стенке трубы.

На процесс отложения солей на внутренних поверхностях труб значительное влияние оказывает скорость теплоносителя. Так, коэффициент теплоотдачи при малых скоростях воды $W = 0,9$ м/с снижается быстрее, чем при скоростях $W = 2,5$ м/с. При этом за одинаковый период эксплуатации снижение коэффициентов теплоотдачи при скоростях $W = 0,9$ м/с превышает аналогичную величину для $W = 2,5$ м/с примерно на 30 %. Физическая сторона указанного явления представляется следующей. Чем больше скорость потока, тем вероятнее, что условия для отложений менее благоприятны из-за больших касательных напряжений на границе жидкости и стенки.

Установлено, что с увеличением жесткости

воды повышается интенсивность накипеобразования, а с продолжительностью времени – влияние усиливается. Анализ экспериментальных данных позволяет заключить, что интенсивность накипеобразования возрастает с повышением температуры потока, что можно объяснить наиболее благоприятными условиями для роста кристаллов солей. С увеличением срока эксплуатации поверхности слой накипи также возрастает.

Аппроксимацией экспериментальных данных получена эмпирическая зависимость изменения интенсивности образования накипи от анализируемых выше параметров процесса

$$J_{gl}/J_v = 11,5(2h/d)^{0,65}(S/d)^{-0,3}, \quad (1)$$

где l, d – длина и диаметр трубы, м; W – скорость охлаждающей воды, м/с; t – температура охлаждающей воды, °С; G – жесткость воды, мг-экв/л; τ – время работы теплообменника, ч; J – интенсивность накипеобразования, г/м².

Идентификацию зависимости (1) выполняли на основе результатов натурных испытаний теплообменных аппаратов в лабораторных и промышленных условиях (см. таблицу).

Сопоставление результатов расчета интенсивности накипеобразования по зависимости (1) с опытными данными показывает удовлетворительное их совпадение (рис. 4), что позволяет исполь-

Условия испытаний теплообменных аппаратов

Тип теплообменника	Место работы	d , м	l , м	W , м/с	G , мг-экв/л	t , °С	τ , ч	J , г/м ²	Обозначение
Водо-водяной стенд	БГТУ	0,017	1	2	18	57	220	22,4	○
Водо-водяной стенд	БГТУ	0,017	1	0,9	18	57	5	28,1	○
Водо-водяной стенд	БГТУ	0,017	1	1,5	18	57	16	31,8	○
Пароводяной стенд	Брянский машзавод (БМЗ)	0,017	1	1,2	3	17	2200	85,8	□
Бойлер	БМЗ	0,017	1,5	0,75	5	20	3600	2102	◇
Конденсатор турбины	ТЭЦ-1	0,022	6	1,9	2	10	7600	303	△
Конденсатор турбины	ГРЭС	0,028	8	1,7	18	24	8000	796	△

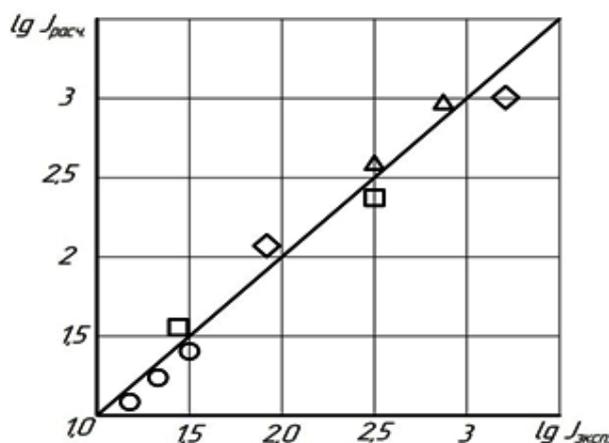


Рис. 4. Сопоставление результатов расчета интенсивности накипеобразования по формуле с опытными данными: ○ – экспериментальная установка БГТУ; □ – пароводяной подогреватель; △ – конденсатор турбины; ◇ – бойлер БМЗ

зовать предложенную зависимость для практических инженерных расчетов.

Чтобы снизить интенсивность накипеобразования на стенках трубок, целесообразно турбулизовать поток [13, 14]. Однако практически невозможно увеличить скорость охлаждающего теплоносителя в теплообменнике более чем до 3 м/с, поскольку возрастает гидродинамическое сопротивление. Использование турбулизаторов увеличивает массогабаритные показатели поверхности теплообмена. В практике же существуют такие поверхности, которые турбулизуют теплоноситель лишь в пристенной зоне. Это и оребрение внутренней поверхности, и ее олунение. Это освоенные промышленностью винтообразно профилированные трубки, теплообмен в которых зависит от геометрических параметров накатки (шаг S и глубина накатки h). В бойлерах и конденсаторах с профилированными трубами коэффициент теплопередачи примерно на 20 % выше, чем для аналогичных режимов в гладких трубках. Однако возникает опасность повышенной интенсивности накипеобразования в них. Измерениями толщины слоя накипи на шлифах с помощью микроскопа Neophot и профилографа-профилометра в гладких и профилированных трубках одинакового диаметра установлено, что на гладкой трубке слой накипи больше.

В профилированных трубках впадины поверхности представляют собой укрытие для частиц накипи от сдвигающих усилий потока воды, поэтому слой отложений первоначально образуется в них. На выступах трубки от ее входа к выходу по потоку слой отложений увеличивается более чем на 20 % на трубках длиной более 8 м. Превалирующее влияние на процесс оказывает глубина накатки по сравнению с ее шагом. Изучение роста слоя выпадающих из воды солей свидетельствует, что чем больше расстояние между выступами и глубиной накатки, тем больше толщина отложений. В то же время во впадинах толщина отложений по длине практически постоянна.

Это объясняется тем, что из-за шероховатости возрастает турбулизация потока, снижающая вероятность сцепления частиц с поверхностью. Эти результаты подтверждены длительными по времени теплогидродинамическими испытаниями гладких и профилированных трубок.

Интенсивность накипеобразования на профилированных трубках аппроксимируется по полученным данным зависимостью

$$J_{gl}/J_v = 11,5(2h/d)^{0,65}(S/d)^{-0,3}. \quad (2)$$

Формула (2) справедлива для трубок, у которых $0,03 < 2h/d < 0,12$ и $0,12 < s/d < 4$. Таким образом, применение профилированных винтовой накаткой трубок в современных теплообменных аппаратах ведет к снижению накипеобразования на стенках трубок и повышению экономичности работы энергооборудования и в конденсаторах, и в бойлерных установках.

Практическая часть

Были рассмотрены разнообразные способы очистки поверхностей теплообменников. Методы постоянной чистки объединяют физические (ультразвуковой [15], электростатический, электромагнитный [16, 17]) и механический (очистка литыми шариками [18], гидронеуматические [19, 20]). Эти способы являются экономичными, простыми в эксплуатации, не требующими дополнительного обслуживающего персонала; они не загрязняют окружающей среды. В общем случае достаточно сложно отдать предпочтение какому-либо способу чистки в связи с необходимостью учитывать условия работы конденсаторов на конкретной станции, поскольку все способы прямо или косвенно влияют на работу теплообменного оборудования.

Нами предложен метод прогнозирования загрязняемости конденсаторов паротурбинных установок. В его основу положены дифференциальные уравнения теплопроводности с учетом термического сопротивления накипи. В конце межремонтного периода работы (6000 ч) из-за отложения солей в трубках недогрев воды увеличивается на 1–2 °С. Вследствие этого возрастает давление в конденсаторе на 0,3–0,6 %, что необходимо учитывать при переменных режимах работы.

На основе эксплуатационных данных выявлено изменение недогрева воды, вакуума и мощности в конденсаторе турбины. Показана необходимость выбора времени проведения чисток вспомогательного оборудования, которое приводит к повышению затрат и снижению надежности турбоустановок.

Необходимо на практике правильно определять наиболее целесообразную периодичность безостановочной работы теплообменных аппаратов. В качестве целевой функции выбиралась стоимостная функция суммарных потерь от невыработки электроэнергии из-за солеотложений в трубках, от невыработки электроэнергии в периоды чистки, а также от затрат на их проведение. В конечной цели требовалось найти такое сочетание количества чисток и их периодичности для заданного времени пуска блока, чтобы выполнялось условие минимизации суммарных потерь. Выбиралась самая тяжелая условия работы энергооборудования юга страны, где жесткость охлаждающей воды составляет $G = 18$ мг-экв/л, а летняя температура ее достигает на входе $t = 26$ °С и держится на этом уровне более двух месяцев. Например, при пуске конденсатора с января оптимальный срок первой чистки наступает через 3000 ч работы, далее конденсатор следует чистить через 2160 ч и через 3600 ч. Если же этот конденсатор ввести в эксплуатацию в начале мая, то периодичность непрерывной работы τ составит 1760 ч, 4000 ч, 3000 ч. Потери для остальных сочетаний периодичности работы между чистками превышают оптимальные.

Для аналогичных данных конденсаторов, работающих в северных регионах страны, охлаждаемых водой малой минерализации ($G = 2$ мг-экв/л) и пониженной начальной температуры, установлено, что поверхности теплообмена целесообразно чистить реже. Например, если начало работы блока приходится на май, то $\tau_1 = 3600$ ч, $\tau_2 = 5160$ ч. Это объясняется меньшей интенсивностью роста отложений и лучшими условиями по поддержанию вакуума.

Анализом экспериментальных данных показано, что за счет увеличения обслуживающим персоналом станции сроков межремонтных периодов потери превышают по данной методике на 15–30 % для южных районов страны и на 5–10 % для северных районов.

В результате проведенных расчетов по изложенному выше методу получены значения коэффициентов чистоты поверхности, используемые для определения коэффициентов теплопередачи конденсаторов. При проектировании оптимизация периодичности работы и чистки позволяет уменьшить поверхность теплообмена в среднем на 5–6 %.

Практическая ценность заключается в том, что полученные эмпирические зависимости для расчета интенсивности солеотложений в трубах могут быть использованы при проектировании теплообменных аппаратов энергоустановок. Выбор оптимального срока чистки конденсаторов дает возможность обоснованно определять период безостановочной работы энергетического оборудования и тем самым позволяет повысить эффективность эксплуатации ПГУ.

Выводы

Экспериментально определены коэффициенты теплопроводности отложений в трубах теплообменных аппаратов. Так, для конденсаторов паротурбинных установок значения величины коэф-

фициентов теплопроводности низкотемпературной накипи изменяется в пределах 1,4–1,8 Вт/м²·°С. Получена зависимость по влиянию на термическое сопротивление слоя накипи ее пористости и температуры воды.

Получена зависимость, устанавливающая взаимосвязь между интенсивностью солеотложений и основными определяющими процесс факторами: скоростью воды, ее средней температурой и жесткостью, геометрией канала, продолжительностью работы; на ее основе возможно прогнозирование снижения тепловой нагрузки теплообменника в эксплуатации.

Показано, что в профилированных трубках интенсивность солеотложений ниже, чем в гладких. С уменьшением относительной глубины и шага накатки наблюдается рост неорганических отложений. Высота выступов накатки оказывает большее влияние, чем шаг между ними. Разработаны рекомендации к расчету относительной загрязняемости гладких и винтообразно профилированных трубок. Применение профилированных трубок вместо гладких в энергетических установках является эффективным средством повышения экономичности энергооборудования.

Установлено, что резкое изменение температуры воды на входе в конденсатор с внутритрубными неорганическими отложениями приводит в тяжелых условиях эксплуатации к недогреву воды до 30 % и падению вакуума до 0,6 % по сравнению с чистым конденсатором.

Предложена методика оптимизации и выполнено технико-экономическое обоснование периодичности чисток теплообменных аппаратов. Для различного календарного времени начала эксплуатации теплообменника получены рациональные сроки проведения чисток. Оптимизация режимов при проектировании позволяет снизить металлоемкость в пределах 5–6 %.

Литература

1. Лаптев, А.Г. Методы интенсификации и моделирования тепломассообменных процессов: учеб.-справ. пос. / А.Г. Лаптев, Н.А. Николаев, М.М. Башаров. – М.: Теплотехник. – 2011. – 335 с.
2. Лаптева, Е.А. Математические модели и расчет теплообменных характеристик аппаратов / Е.А. Лаптева, Т.М. Фарахов; под. ред. А.Г. Лаптева. – Казань: Отечество, 2013. – 182 с.
3. Телин, Н.В. Кинетика накипеобразования на поверхности теплообмена / Н.В. Телин // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2015. – № 8. – С. 35–37.
4. Готовский, В.А. Повышение эффективности теплообменных аппаратов при применении олуенных теплообменных труб / В.А. Готовский, К.В. Пермяков, Г.А. Курмелев // Новости теплоснабжения. – 2012. – № 08 (144). – С. 19–27.
5. Глухарев, А.С. Повышение эффективности теплообменных аппаратов за счет оребрения внутритрубного пространства / А.С. Глухарев // Молодежный научно-технический вестник МГТУ. – 2017. – № 1. – Эл. №. ФС77-51038.
6. Зимняков, А.М. Анализ химических отложений теплового оборудования и способы их очистки / А.М. Зимняков, Р.В. Наумов // Известия Пензенского государственного педагогического университета имени В.Г. Белинского. Естественные науки. – 2010. – № 17. – С. 104–108.
7. Фесак, Д.В. Проблема засорения трубопроводов теплообменника и методы её решения / Д.В. Фесак, А.А. Литвиненко // Современные научные исследования и инновации. – 2012. – № 4. – <https://web.snauka.ru/issues/2012/04/11077> (дата обращения: 21.05.2021).

8. Галковский, В.А. Анализ снижения коэффициента теплопередачи теплообменных аппаратов вследствие загрязнения поверхности / В.А. Галковский, М.В. Чупова // Интернет-журнал «Науковедение». – 2017. – Т. 9, № 2. – <http://naukovedenie.ru/PDF/41TVN217.pdf>.
9. Леонтьев, А.И. Анализ эффективности пристенных закручивателей потока (обзор) / А.И. Леонтьев, В.В. Олимпиев // Теплоэнергетика. – 2013. – № 1. – С. 68–78.
10. Бродов, Ю.М. Исследование ряда методов интенсификации теплообмена в энергетических теплообменных аппаратах / Ю.М. Бродов, А.Ю. Рябчиков, К.Э. Аронсон // Труды РНКТ-3. Т. 6. Интенсификация теплообмена. – М.: МЭИ, 2002. – С. 49.
11. Повышение эффективности теплообменных аппаратов паротурбинных установок за счет изменения профильных витых трубок / Ю.М. Бродов, К.Э. Аронсон, А.Ю. Рябчиков и др. // Проблемы энергетики. – 2016. – № 7–8. – С. 3–13.
12. Давидзон, М.И. Образование накипи внутри трубок теплообменных устройств в условиях постоянной температуры стенки / М.И. Давидзон // Теплоэнергетика. – М.: МЭИ, 2007. – № 9. – С. 61–64.
13. Повышение эффективности работы теплообменников компрессоров и технологического оборудования / С.В. Корнеев, А.М. Дёмин, М.А. Дёмин и др. // Вестник СибАДИ. – 2012. – № 3. – С. 18–21.
14. Шелепов, И.Г. Оптимизация режимов эксплуатации конденсаторов паровых турбин с учетом характеристик отложений в трубных пучках / И.Г. Шелепов, М.А. Сафронюк // Энергетические и тепло-технические процессы и оборудование. – 2006. – № 5. – С. 88–95.
15. Исследование эффективности ультразвукового метода снижения скорости образования накипи в паяных пластинчатых теплообменниках / Г.М. Волк, В.З. Галутин, В.П. Мелихова и др. // Энергосбережение. – 2003. – № 2. – С. 14–18.
16. Кошоридзе, С.И. Физическая модель снижения накипеобразования при магнитной обработке воды в теплоэнергетических устройствах / С.И. Кошоридзе, Ю.К. Левин // Теплоэнергетика. – 2009. – № 4. – С. 66–68.
17. Кошоридзе, С.И. Механизм снижения накипи при магнитной обработке водного потока / С.И. Кошоридзе, Ю.К. Левин // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 9. – С. 33–39.
18. Тумановский, А.Г. Эффективность использования системы шариковой очистки конденсатора паровой турбины / А.Г. Тумановский, Ю.Г. Иванов, Н.В. Болдырев // Новости теплоснабжения. – 2011. – № 7. – С. 29–32.
19. Миндрин, В.Н. Гидропневматический способ очистки трубок конденсаторов паровых турбин / В.Н. Миндрин, Г.В. Пачурин, Н.А. Кузьмин // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – № 6, ч. 1 – С. 42–47.
20. Патент РФ № 2366881. Гидродинамический способ очистки трубчатых теплообменников систем охлаждения энергетических установок / В.Т. Данковец, В.А. Николаев, А.М. Сидорук; заявитель и патентообладатель Омский государственный университет путей сообщения; заявл. 10.12.2007; опубл. 10.09.2009.

Татаринцев Вячеслав Александрович, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Трубопроводные транспортные системы», Брянский государственный технический университет, г. Брянск; v_a_t52@mail.ru.

Поступила в редакцию 26 апреля 2021 г.

DOI: 10.14529/power210301

INCREASING THE OPERATION EFFICIENCY OF HEAT EXCHANGERS WITH INNER PIPE DEPOSITS

V.A. Tatarintsev, v_a_t52@mail.ru

Bryansk State Technical University, Bryansk, Russian Federation

The article studies the effect of scale formation on the efficiency of heat exchangers, as applied to condensers of steam turbines, steam-water heaters and boilers of boiler installations. The purpose of the study is to generate recommendations on how to increase the efficiency of steam turbine units (STU) condensers. This was achieved by studying the chemical and physical properties of the inorganic deposits layer and their structure;

obtaining the dependencies to calculate the thermal resistance of the sediment layer on the surfaces of smooth and profiled pipes; analyzing various methods of cleaning surfaces and developing recommendations on the cleaning frequency for the capacitors. The paper also describes the results of the physicochemical analysis of inorganic salt deposition. The thermal resistance of the deposits was determined by the thickness of the scale layer and its coefficient of thermal conductivity. The layer thickness was measured with a microscope and a profilograph-profilometer on thin sections. The obtained relationship is the one between the intensity of salt deposition and the main factors determining the process: the speed of water, its average temperature and hardness, the geometry of the channel, the duration of work. Based on that it one can predict a decrease in the heat load of the heat exchanger in operation. The dependence of the influence of the temperature of the coolant and the porosity of the scale on the thermal conductivity is obtained. It is shown that in profiled pipes the scale deposition is less intensive than in the smooth ones. With a decrease in the relative depth and roll pitch, an increase in inorganic deposits is observed. The height of the knurled ridges has a greater influence than the pitch between them. The paper presents recommendations for the calculation of the relative contamination of smooth and helical-shaped tubes. The use of profiled tubes instead of smooth ones in power plants is an effective means of increasing the efficiency of power equipment. Various methods of surface cleaning are considered. An optimization technique is proposed and a technical and economic substantiation of the frequency of cleaning of heat exchangers is carried out. Rational terms of cleaning were obtained for different calendar times of the start of operation of the heat exchanger.

Keywords: heat exchangers, profiled tubes, scale formation, work efficiency.

References

1. Laptev A.G., Nikolaev N.A., Basharov M.M. *Metody intensivatsii i modelirovaniya teplomassoobmenykh protsessov: ucheb.-sprav. pos.* [Methods of intensification and modeling of heat and mass exchange processes]. Moscow, Teplotekhnika Publ., 2011. 335 p.
2. Lapteva E.A., Farakhov T.M. *Matematicheskiye modeli i raschet teploobmennykh kharakteristik apparatov* [Mathematical models and calculation of heat exchange characteristics of apparatuses]. Kazan, Otechestvo Publ., 2013. 182 p.
3. Telin N.V. [Kinetics of scale formation on the heat exchange surface]. *Bulletin of the Cherepovets State University*, 2015, no. 8, pp. 35–37. (in Russ.)
4. Gotovsky V.A., Permyakov K.V., Kurmelev G.A. [Improving the efficiency of heat exchangers when using lunar heat exchangers]. *Heat Supply News*, 2012, no. 08 (144), pp. 19–27. (in Russ.)
5. Glukharev A.S. [Improving the efficiency of heat exchangers due to the ribbing of the in-pipe space]. *Youth Scientific and Technical Bulletin of MSTU*, 2017, no. 1, EI No. FS77-51038. (in Russ.)
6. Zimnyakov A.M. [Analysis of chemical deposits of thermal equipment and methods for their cleaning]. *Izvestiya of the Penza State Pedagogical University named after V.G. Belinsky. Ser. Natural sciences*, 2010, no. 17, pp. 104–108. (in Russ.)
7. Fesak D.V., Litvinenko A.A. The problem of clogging of the heat exchanger and the methods of its solution. *Modern scientific researches and innovations*, 2012, no. 4. Available at: <https://web.snauka.ru/issues/2012/04/11077> (accessed 21.05.2021). (in Russ.)
8. Galkovskiy V.A., Chupova M.V. [Analysis of the reduction of the heat transfer coefficient of heat exchangers due to surface contamination]. *Internet-zhurnal "Naukovedenie"* [Internet-journal "Science of Science"], 2017, vol. 9, no. 2. Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/41TVN217.pdf> (accessed 27.05.2021). (in Russ.)
9. Leont'ev A.I., Olimpiev V.V. Analyzing the effectiveness of wall flow swirlers. *Thermal Engineering*, 2013, vol. 60, no. 1, pp. 67–77. DOI: 10.1134/S0040601512070105
10. Brodov Yu.M., Ryabchikov A.Yu., Aronson K.E. [Investigation of a number of methods for the intensification of heat transfer in energy heat exchangers]. *Trudy RNKT-3. T. 6. Intensifikatsiya teploobmena* [Proceedings of RNKT-3. Vol. 6. Intensification of heat exchange]. Moscow, MEI Publ., 2002, p. 49. (in Russ.)
11. Brodov Yu.M., Aronson K.E., Ryabchikov A.Yu., Blinkov S.N., Kuptsov V.K., Murmansk I.B. [Increasing the efficiency of heat exchangers of steam turbine plants due to the use of profiled twisted tubes]. *Energy Problems*, 2016, no. 7–8, pp. 3–13. (in Russ.)
12. Davidzon M.I. Formation of scale inside the tubes of heat exchangers at a constant wall temperature. *Thermal Engineering*, 2007, vol. 54, no. 9, pp. 739–742. DOI: 10.1134/S0040601507090121
13. Korneev S.V., Demin A.M., Demin M.A., Sorokin V.N., Kabakov A.N. [Improving the efficiency of heat exchangers of compressors and technological equipment]. *Bulletin of SibADI*, 2012, no. 3, pp. 18–21. (in Russ.)
14. Sheleпов I.G., Safronyuk M.A. [Optimization of operating modes of steam turbine condensers taking into account the characteristics of deposits in tube bundles]. *Energeticheskiye i teplo-tekhnicheskiye protsessy i oborudovaniye* [Energy and heat engineering processes and equipment], 2006, no. 5, pp. 88–95. (in Russ.)
15. Wolk G.M., Galutin V.Z., Melikhova V.P., Shcherbakov S.N., Frolov V.P. [Investigation of the effectiveness of the ultrasonic method for reducing the rate of scale formation in brazed plate heat exchangers]. *Energoberezheniye* [Energy saving], 2003, no. 2, pp. 14–18. (in Russ.)

16. Koshoridze S.I., Levin Yu.K. Physical model of scale-formation reduction under magnetic treatment of water in thermal engineering devices. *Thermal Engineering*, 2009, vol. 56, no. 4, pp. 338–341.
17. Koshoridze S.I., Levin Yu.K. [Mechanism for reducing scale during magnetic treatment of water flow]. *Fundamental'nyye issledovaniya* [Fundamental research], 2014, no. 9, pp. 33–39. (in Russ.)
18. Tumanovskiy A.G., Ivanov Yu.G., Boldyrev N.V. [Efficiency of using a ball cleaning system for a steam turbine condenser]. *Novosti teplosnabzheniya* [News of heat supply], 2011, no. 7, pp. 29–32. (in Russ.)
19. Mindrin V.N., Pachurin G.V., Kuzmin N.A. [Hydropneumatic method for cleaning the tubes of steam turbine condensers]. *International Journal of Applied and Fundamental Research*, 2015, no. 6, part 1, pp. 42–47. (in Russ.)
20. Dankovtsev V.T., Nikolaev V.A., Sidoruk A.M. *Gidrodinamicheskiy sposob ochistki trubchatykh teploobmennikov sistem okhlazhdeniya energeticheskikh ustanovok* [Hydrodynamic method of cleaning tubular heat exchangers of cooling systems of power plants]. Patent RF, no. 2366881, 2009.

Received 26 April 2021

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Татаринцев, В.А. Повышение эффективности работы теплообменных аппаратов с внутритрубными отложениями / В.А. Татаринцев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2021. – Т. 21, № 3. – С. 5–13. DOI: 10.14529/power210301

FOR CITATION

Tatarintsev V.A. Increasing the Operation Efficiency of Heat Exchangers with Inner Pipe Deposits. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2021, vol. 21, no. 3, pp. 5–13. (in Russ.) DOI: 10.14529/power210301
