

ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 622.5 + 504

С. П. Высоцкий, д-р техн. наук, В. С. Черман

ГОУВПО «Донбасская национальная академия строительства
и архитектуры», г. Макеевка

ГЕНЕРАЦИЯ ЭНЕРГИИ И ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ НАКИПЕОБРАЗОВАНИЯ

Исчерпание природных ресурсов вызывает необходимость их экономного использования. В настоящее время наиболее удобной к использованию формой энергии является электрическая. Электрическая энергия производится в основном на ТЭС и АЭС. К основным экологическим проблемам ТЭС, работающих на угле, относятся: поступление в биосферу продуктов сжигания топлива в котлоагрегатах, охлаждение пара в турбинах, сбросы загрязненных вод в водоемы и пр. Экономичность работы ТЭС зависит от наличия отложений на поверхностях нагрева. Потеря мощности на современных энергоблоках при снижении вакуума в конденсаторах турбин всего на 0,01 ата для блоков 200 МВт составляет 1,96 МВт, блоков 300 МВт – 3,34 МВт и блока 1000 МВт – 16 МВт.

Ключевые слова: генерация энергии, топливо, затраты, накипеобразование, конденсаторы турбин, карбонатный индекс

Введение

Мы живем среди потоков энергии: космической, солнечной, электрической, тепловой, биологической и других. Благодаря солнечной энергии миллионы лет назад возникло и еще продолжает существовать все многообразие жизни на нашей планете, а также возникли многие виды энергетических и других ресурсов. Однако хищническое их исчерпание вызывает несколько запоздалую реакцию на необходимость их экономного использования. По образному выражению Альберта Гора, бывшего вице-президента США, мы относимся к Земле, как к фирме, которая находится в стадии банкротства [1].

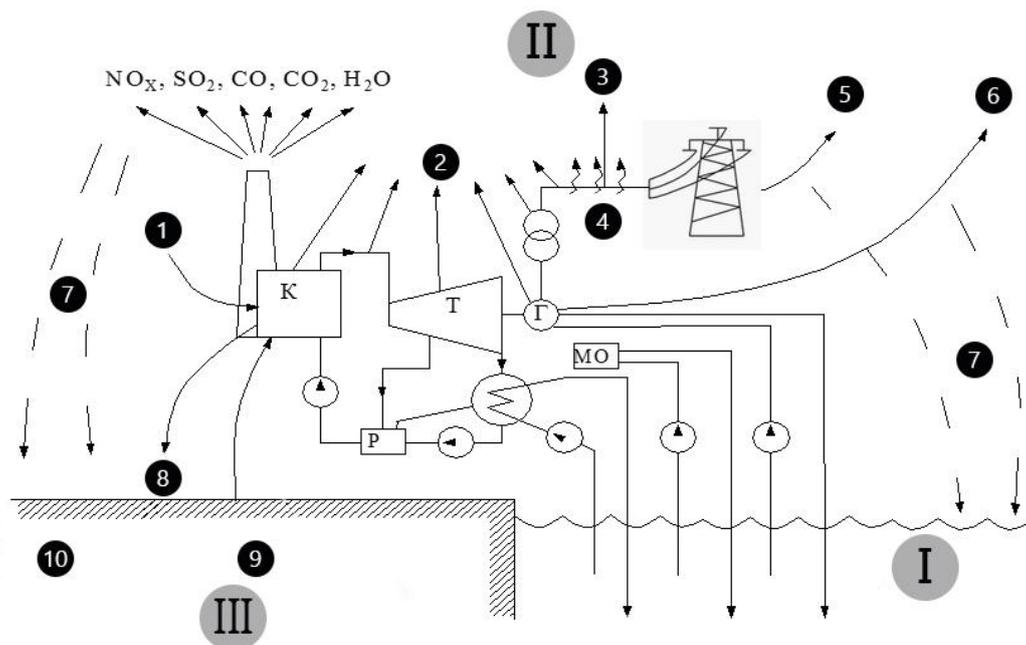
В настоящее время наиболее удобной к использованию формой энергии является электрическая. Это обусловлено тем, что она с легкостью преобразуется в другие формы: механическую, тепловую, световую, химическую и т. д. К сожалению, до настоящего времени эта энергия производится с низким коэффициентом полезного действия. На рисунке 1 показана принципиальная схема генерации энергии на современной ТЭС.

Из представленного рисунка видно, насколько многообразно неблагоприятное воздействие тепловой электростанции на окружающую природу.

К основным экологическим проблемам ТЭС, работающих на угле, относятся: пыление при хранении и транспортировке угля; поступление в биосферу продуктов сжигания топлива в котлоагрегатах; охлаждение пара в турбинах; сбросы загрязненных вод в водоемы; хранение шлама в золоотвалах и другие.

При сжигании топлива на ТЭС вся его масса превращается в отходы, при этом продукты сгорания в несколько раз превышают массу топлива за счет включения азота и кислорода воздуха.

Загрязнение атмосферного воздуха в большей степени происходит при сжигании топлива. К основным компонентам относятся: пылевые частицы различного состава, оксиды серы и азота, фтористые соединения, оксиды металлов, газообразные продукты неполного сгорания топлива. В общем загрязнении атмосферы отходами производства теплоэнергетические выбросы вредных веществ составляют: по твердым (золе) – до 35 %; диоксиду серы – до 50 %; оксидам азота – до 25 %. Их поступление в воздушную среду наносит большой ущерб как всем основным компонентам биосферы, так и предприятиям, объектам городского хозяйства, транспорту и населению городов.



I – гидросфера; II – атмосфера; III – литосфера; К – котел; Т – турбина;
 P – регенеративный подогрев питательной воды; Г – генератор; МО – маслоохладитель;
 1 – воздух; 2 – теплота, шум; 3 – электромагнитные поля; 4 – линии электропередач;
 5 – теплота; 6 – пар; 7 – осадки; 8 – шлам; 9 – ископаемое топливо; 10 – изменение ландшафта

Рисунок 1 – Схема генерации электрической энергии и взаимодействия тепловой электростанции с окружающей средой

Влияние ТЭС на литосферу заключается в следующем: поверхностные сбросы и фильтрация приводит к загрязнению прилегающей территории; тепловое воздействие приводит к изменению термического состояния грунтов; уменьшению количества земель пригодных для сельхозугодий; изменению радиоактивного фона территории; накоплению в почве тяжелых металлов, которые подземными водами переносятся в водоемы.

Степень неблагоприятного влияния зависит от КПД генерации энергии и, соответственно, от количества сжигаемого топлива. По данным многочисленных исследований [2–4] основные потери тепловой энергии сжигаемого топлива происходят в конденсаторах турбин.

Дополнительные затраты, обусловленные загрязнением теплообменных поверхностей, можно разделить на 4 основных категории: увеличение капитальных затрат; увеличение энергетических затрат; увеличение общих затрат на производство; дополнительные затраты на охрану окружающей среды.

Оценочные затраты, обусловленные загрязнением поверхностей нагрева в некоторых западных странах, приведены в таблице 1 [5].

Таблица 1 – Финансовые затраты на энергоносители и устранение загрязнений поверхностей нагрева

Затраты, обусловленные загрязнением поверхностей	Страны				
	США	Япония	ФРГ	Соединенное Королевство	Мировые
млрд долларов США	10–12	3,5	1,6	1,0	30
% от ВВП	0,35–0,40	0,25–0,30	0,25–0,30	0,30–0,35	0,25

Целью исследования является оценка видов неблагоприятного воздействия и уменьшения их интенсивности, в первую очередь за счет интенсивности накопобразования на

теплопередающих поверхностях.

Изложение основного материала исследований

На ТЭС могут сжигаться различные виды топлива.

Для удобства сопоставления различных видов энергоресурсов и возможности расчетов расход всех видов топлива сравнивается с расходом так называемого условного топлива. За условное принято такое топливо, при сгорании 1 кг которого выделяется 29,3 МДж или 7 000 ккал энергии. В таблице 2 приведены значения удельной энергоемкости для ряда энергетических ресурсов в сравнении с условным топливом.

Таблица 2 – Значения удельной энергоемкости для ряда энергетических ресурсов в сравнении с условным топливом

Виды топлива	Условное топливо	Уголь антрацит	Дрова сухие	Нефть	Газ пропан	Водород
Уд. энергоемкость, МДж/кг	29,3	33,5	10,5	41,9	46,1	120,6
ккал/кг	7 000	8 000	2 500	10 000	11 000	28 800

Видно, что высокой энергоемкостью обладают газ и нефть, что во многом и определило их хищническое потребление.

Тепловая энергия не полностью превращается в другие виды энергии. Указанные отличительные особенности тепловой энергии, условия ее превращения в другие виды энергии определяются II законом (началом) термодинамики.

Согласно этому закону процессы, связанные с теплообменом при конечной разности температур, необратимы, т. е. могут протекать самопроизвольно только в одном направлении: от горячих к холодным телам с установлением равновесия в системе.

Для оценки практической пригодности энергии, содержащейся в материи, важно знать не только количество эксергии, но и концентрацию, т. е. отношение эксергии к объему термодинамического агента (энергоносителя). Чем выше концентрация эксергии, т. е. плотность энергопотока, тем лучше показатели сооружения и эксплуатации энергетических установок. Очевидно, что 1 Дж энергии в виде электричества имеет большую ценность для потребителя, чем 1 Дж в виде низкотемпературного тепла, например горячей воды. А такой энергоноситель, как лазерный поток, имеет еще больший эксергетический показатель.

Важной проблемой ресурсосбережения является экономия водопотребления. Основной составляющей экономии водопотребления является многократное использование, а следовательно, увеличение концентрации загрязнений в циркуляционной системе. Это положение противоречит требованиям обеспечения надежности и экономичности работы конденсаторов и, следовательно, электростанций. С увеличением концентрации катионов кальция и магния, анионов: сульфатов, хлоридов и минерализации циркулирующей воды увеличивается ее агрессивность по отношению к конструкционным материалам и интенсивность образования отложений как на теплопередающих поверхностях, так и на оросителях градирен. Наличие отложений в свою очередь усиливает коррозионные процессы вследствие возникновения пар дифференциальной аэрации, а также вызывает недовыработку электроэнергии и увеличение удельного расхода энергии на ее выработку. Так, потеря мощности для современных энергоблоков при снижении вакуума в конденсаторе всего на 0,01 ата (в результате загрязнения трубок конденсаторов) для блоков 200 МВт составляет 1,96 МВт, блоков 300 МВт – 3,34 МВт и блока 1000 МВт – 16 МВт.

Снижение вакуума в конденсаторе и, соответственно, потеря мощности энергоблоков зависят от термического сопротивления загрязнений на теплопередающих поверхностях. При одинаковой толщине загрязнений поверхностей неорганическими веществами последние располагаются в следующий ряд по степени снижения теплопередачи.

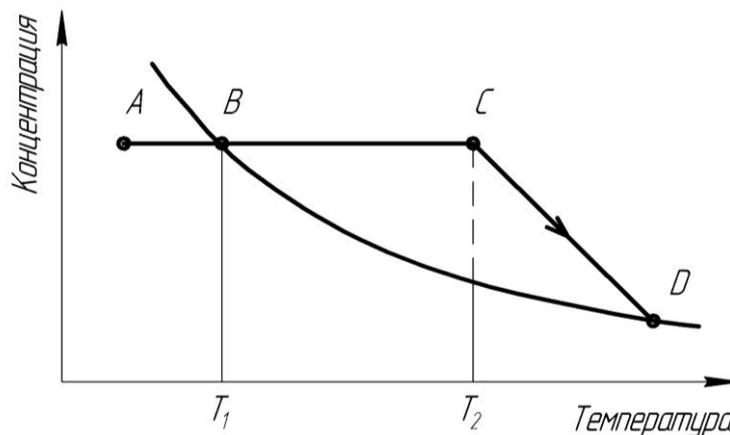


Рисунок 2 – Изменение свойств среды, содержащей соединения с обратной растворимостью

На рисунке 2 показано изменение свойств среды, содержащей соединения с обратной растворимостью, например, гидрокарбонат кальция, гипс и т. д. В точке А раствор не насыщен. После подогрева и достижения температуры T_1 (точка В) раствор становится насыщенным. При увеличении подогрева и достижения точки С раствор становится пересыщенным. В точке С температура раствора достигает предела пересыщения и начинается кристаллизация. После дальнейшего подогрева в результате кристаллизации соединений – загрязнителей из раствора происходит снижение их концентрации и равновесие устанавливается в точке D. Наиболее сильное влияние на интенсивность кристаллизации оказывает состав воды. На рисунке 3 показано влияние pH – рПК на интенсивность образования отложений.

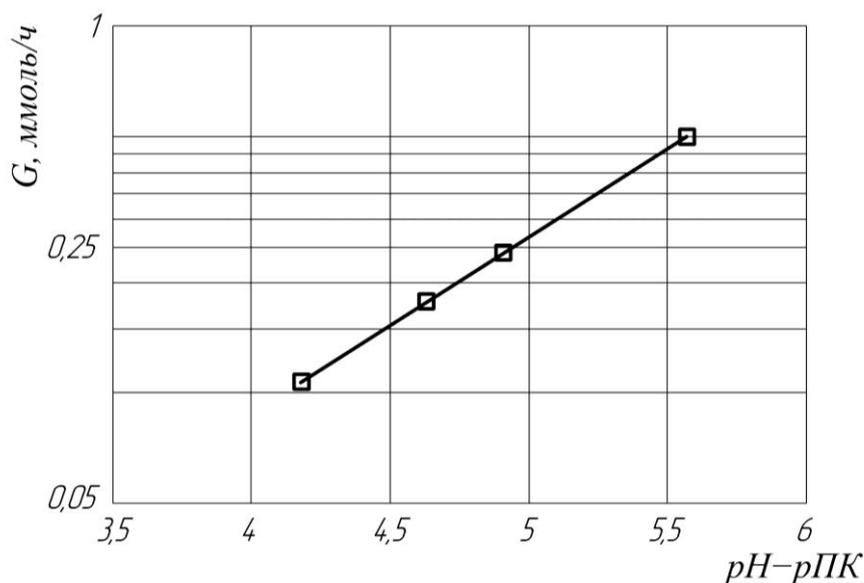


Рисунок 3 – Зависимость количества отложений на поверхности нагрева от показателя (pH – pПК)

В соответствии с экспериментальными данными были произведены расчеты по определению количества отложений на поверхности нагрева. Зависимость количества отложений

на поверхности нагрева выражается формулой:

$$G = 1,09 \cdot 10^{-3} \cdot \exp 1,1(\text{pH} - \text{pPK}),$$

где G – количество отложений, моль/ч;

pH – водородный показатель;

pPK – произведение концентраций.

Движущей силой процесса образования твердой фазы является градиент химического потенциала, который характеризуется величиной пресыщения по данному накипеобразователю. Однако при том же самом пресыщении удельное количество накипи, которое образуется в водогрейном оборудовании, зависит от факторов, определяющих кинетику процесса: температуры, гидродинамики, конструктивных характеристик оборудования, концентрации накипеобразователей в воде, а также pH раствора.

В работе установлено, что вихри в потоке жидкости способны проникнуть в слоистый подслои и транспортировать твердые материалы на поверхность. Турбулентные всплески являются эффективным механизмом удаления частиц с поверхности. Термофорез определяется как движение мелких частиц в потоке жидкости под влиянием температурного градиента. Механизм термофореза важен для частиц размером менее 5 микрон и становятся доминирующими при размере частиц около 0,1 микрона.

На сцепление с поверхностью оборудования частиц накипи влияют силы адгезии (рисунок 4). Причина адгезии заключается в молекулярном притяжении контактирующих фаз или их химическом взаимодействии. Обработка в координатах $\ln(F) = f(d)$ экспериментальных данных, полученных в [6], позволила получить уравнение зависимости сил адгезии от размера частиц.

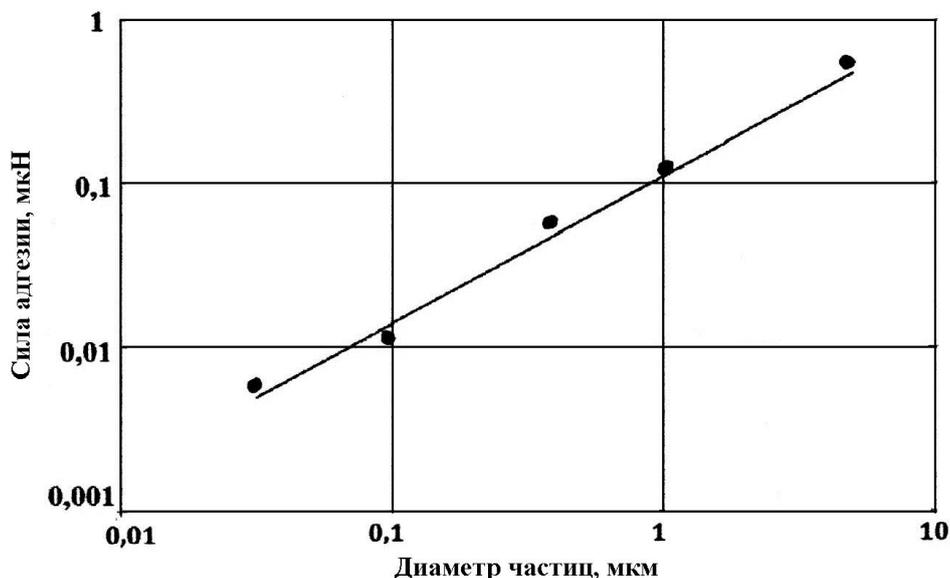


Рисунок 4 – Силы адгезии в зависимости от диаметра частиц CaCO_3

$$F = 0,106 \cdot d^{0,98}; R^2 = 0,99.$$

Наиболее широко используемые технологии снижения интенсивности загрязнения трубчатых теплообменных поверхностей включают:

- увеличение скорости потока;
- периодическое изменение направления потока;
- влияние на степень шероховатости теплообменных поверхностей или выбор типа материалов теплопередающих поверхностей;
- теплообмен в псевдооживленном слое материала;

- применение пульсирующего потока;
- применение турбулизаторов потока;
- подача очищающих материалов (например, шариков из губчатой резины) через трубы теплообменника;
- воздействие на свойства воспринимающей тепло среды (обработка или очистка среды).

Отложения, которые имеют малые адгезионные характеристики к теплопередающим поверхностям, могут быть удалены за счет увеличения скорости потока. Например, соединения алюминия, обладающие значительным термическим сопротивлением, полностью удаляются после увеличения скорости потока на короткий период времени. При этом такое решение гораздо эффективнее по сравнению с реверсированием потока среды. Эти решения актуальные при теплопередаче к потокам сточных вод соответствующих предприятий или при обработке вод горнодобывающих предприятий.

Преобладающим типом накипи в системах ТЭС является карбонат кальция. Последний может кристаллизоваться в двух формах кальция и арагонита. На переход из одной формы в другую влияют присутствующие в растворе ионы других металлов. Степень влияния отражена в таблице 3.

Таблица 3 – Механизм перехода от кальцита к арагониту в зависимости от ионного радиуса и энергии гидратации [7, 8]

Переход от кальцита к арагониту под воздействием иона					
присутствующий			отсутствующий		
Катионы	Ионный радиус, Å	Энергия гидратации, eV	Катионы	Ионный радиус, Å	Энергия гидратации, eV
Mg ²⁺	0,78	21,2	Mn ²⁺	0,91	
Ni ²⁺	0,78	22,4	Cd ²⁺	1,03	20,1
Co ²⁺	0,82	22,6	Ca ²⁺	1,06	17,7
Fe ²⁺	0,83	21,7	Sr ²⁺	1,27	16,6
Zn ²⁺	0,83	22,9	Pb ²⁺	1,32	
Cu ²⁺		22,3	Ba ²⁺	1,43	15,0

Кроме указанных факторов интенсивность накипеобразования зависит от температуры теплопередающей стенки и скорости жидкости. Последняя определяет интенсивность доставки накипеобразователей к теплопередающей поверхности. В результате обработки экспериментальных данных, полученных во Всероссийском теплотехническом институте и Московском энергетическом институте, составлена математическая модель процесса накипеобразования [8, 9].

Обработанные нами результаты исследований приведены на рисунке 5.

Получена корреляционная зависимость интенсивности накипеобразования от скорости потока и температуры стенки. Эта зависимость выражается формулой:

$$j = \frac{5,55 \cdot 10^{-2} \cdot V}{V + 5,55} \cdot \exp(8,3 \cdot 10^{-2} \cdot t), R^2 = 0,99,$$

где V – скорость потока, м/с;

t – температура стенки, °C.

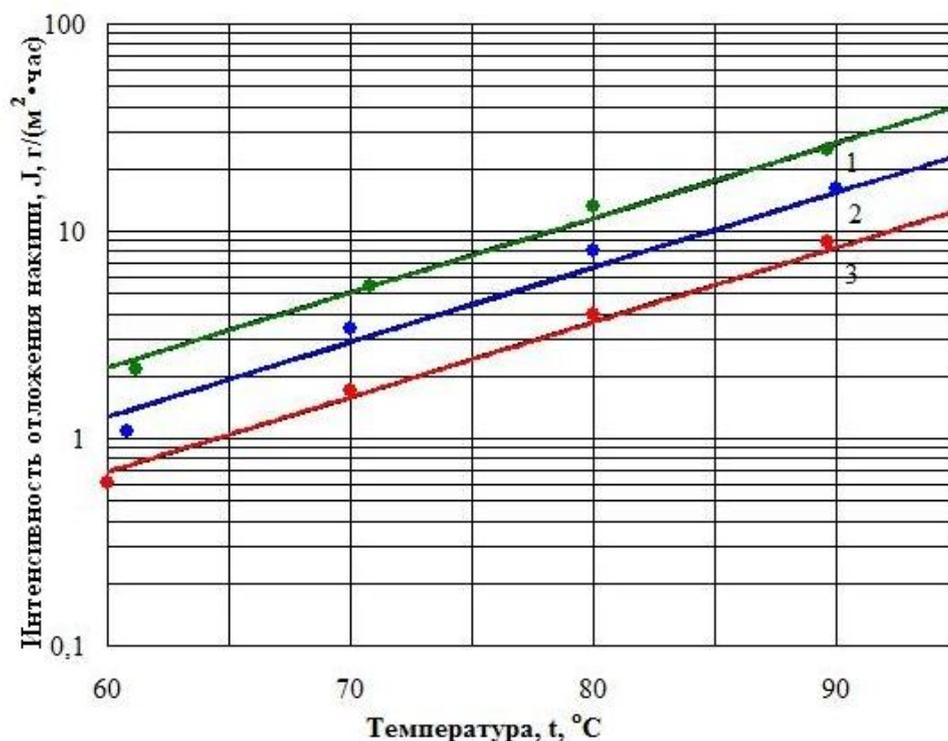


Рисунок 5 – Зависимость интенсивности отложения накипи от температуры и скорости потока воды (скорости потока: 1 – 2 м/с; 2 – 1 м/с; 3 – 0,5 м/с)

При отведении тепла от теплообменников очень важно, чтобы коэффициент загрязнения находился на самом низком уровне. Из таблицы 4 видно, что при увеличении толщины отложений резко растет потребление энергии, которая увеличивает текущие эксплуатационные расходы.

Таблица 4 – Изменение энергозатрат и коэффициента теплопередачи в зависимости от толщины накипи

Толщина отложений, мм	Коэффициент теплопередачи, Вт/м ² ·°К	Увеличение энергозатрат, %
0,15	4184	5,3
0,30	1730	10,6
0,60	862	21,5
0,90	578	32,2
1,20	433	43,0

Влияние типов обработки воды на интенсивность накипеобразования и уровень затрат приведено в [9].

Тип кристаллов, образующихся на поверхности теплопередачи, зависит от температуры нагрева воды (рисунок 6). Когда меняется тип кристаллов, всегда увеличивается индукционный период кристаллизации.

К значительному повышению температуры стенок труб приводит образование на внутренней поверхности котла слоя накипи толщиной всего 1–2 мм. Допустимая величина интенсивности образования отложений 0,11 г/(м²·ч). Загрязнение теплообменных поверхностей накипными отложениями снижает эффективность работы оборудования, требует периодической остановки для проведения дорогостоящих мероприятий по его очистке, а также возникает необходимость в дополнительном обслуживании либо преждевременной замене

отдельных элементов, вызывает цепочку экономических затрат при транспортировке и потреблении тепла.

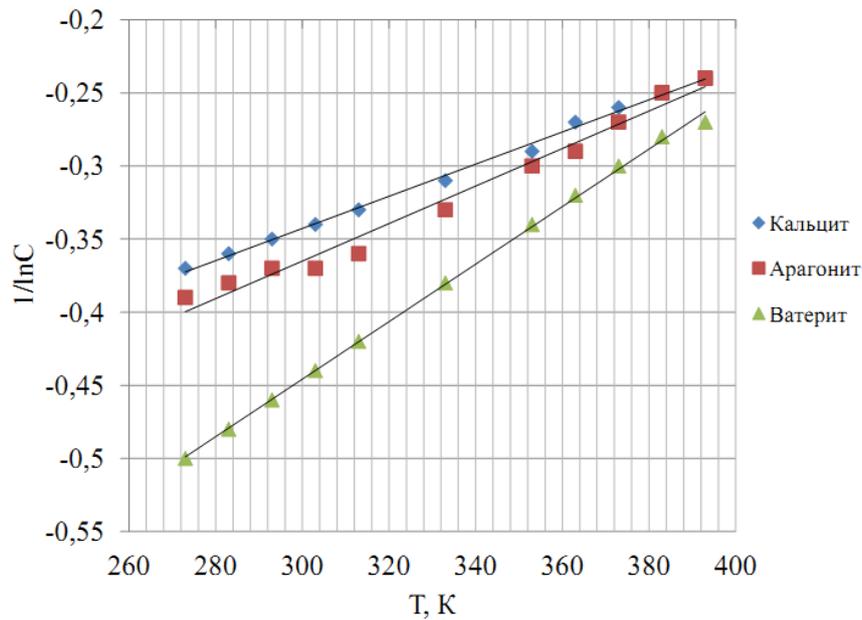


Рисунок 6 – Полиморфные модификации карбоната кальция в зависимости от температуры

Кроме указанных факторов на количество образующихся отложений основное влияние оказывают жесткость, щелочность обрабатываемой воды и содержание углекислоты (рисунок 7).

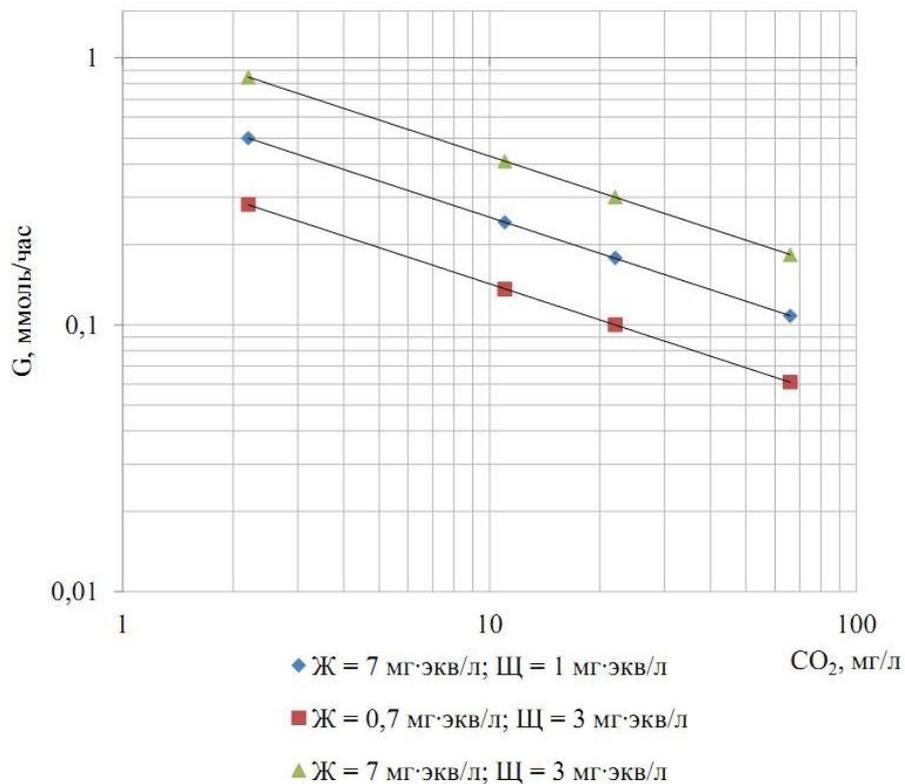


Рисунок 7 – Влияние качества обрабатываемой воды на интенсивность образования отложений

Выводы

1. Использование природных энергетических ресурсов вызывает быстрое их истощение и необходимость поиска альтернативных источников. Самым экономичным методом генерации энергии является снижение потерь в цикле генерации и экономия энергии.

2. Анализ процесса генерации энергии показывает, что наибольший уровень потерь тепловой энергии происходит в конденсаторах турбин вследствие загрязнения теплопередающих поверхностей. Приведено ранжирование влияния различных материалов – загрязнителей на уровень вакуума в конденсаторах турбин и соответствующее снижение мощности энергоблоков различной мощности.

3. Приведен перечень факторов, позволяющих снизить интенсивность накипеобразования на поверхностях нагрева. Одним из наиболее значимых факторов является загрязнение поверхностей соединениями карбоната кальция.

4. Интенсивность образования отложений зависит от таких факторов: разница рН – рПК, индукционный период кристаллизации, температура среды, размер кристаллов, форма кристаллов карбоната кальция, произведение растворимости соответствующей формы карбоната кальция, наличие ионов металлов, обуславливающих тип кристаллов.

5. Приведены аналитические зависимости для оценки воздействия на интенсивность кристаллизации соответствующих форм кристаллов.

Список литературы

1. Гор, Эл. Земля на чаше весов. Экология и человеческий дух / Эл. Гор ; перевод с английского. – Москва : ППП, 1993. – 429 с.
2. Energy Savers: Tips on Saving Money and Energy at Home. US Department of Energy. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. DOE. – 2011. – 1–44 p.
3. Bell, K. J. Mueller A.C. Wolverine Engineering. Data Book II. Wolverine Tube Inc. / K. J. Bell, A. C. Mueller. – 2001. – 20 p.
4. Жданов, О. В. Накипь и проблемы теплоэнергетики / О. В. Жданов // Новости теплоснабжения. – 2006. – № 4(68). – С. 50–54.
5. Kjellander, M. Formation and Prevention of Calcite Scale at Davamyran / M. Kjellander. – Umea Energy, 2015. – 24 p.
6. Beaudoin, S. A. Theoretical and Experimental Study of Surface Forces in Adhesion of Particles to thin Films / S. A. Beaudoin // Chemical Engineering, Purdue: Purdue Universit. – 2007. – P. 36.
7. Handbook of Industrial Water Treatment. Cooling Water Systems. Chapter 25 – Deposit and Scale Control – Cooling System / Water Technologies and Solutions. Suez. – 2020. – 25 p.
8. Высоцкий, С. П. Очистка, кондиционирование и использование вод повышенной минерализации / С. П. Высоцкий, С. Е. Гулько. – Донецк : Каштан, 2014. – 316 с.
9. Высоцкий, С. П. Эколого-экономические аспекты обработки шахтных вод для подпитки тепловых сетей / С. П. Высоцкий, Е. Л. Головатенко // Вести Автомобильно-дорожного института = Bulletin of the Automobile and Highway Institute. – 2020. – № 3(34). – С. 81–87.

С. П. Высоцкий, В. С. Черман

**ГОУВПО «Донбасская национальная академия строительства
и архитектуры», г. Макеевка**

Генерация энергии и предотвращение накипеобразования

Генерация энергии на тепловых электростанциях связана с использованием воды в качестве теплоносителя. Несмотря на применение различных технологий по очистке воды, остаточное количество загрязнений вызывает образование отложений на теплопередающих поверхностях.

Наличие отложений в свою очередь усиливает коррозионные процессы вследствие возникновения пар дифференциальной аэрации, а также вызывает недовыработку электроэнергии и увеличение удельного расхода энергии на ее выработку. Так, потеря мощности для современных энергоблоков при снижении вакуума в конденсаторе всего на 0,01 ата (в результате загрязнения трубок конденсаторов) для блоков 200 МВт составляет 1,96 МВт, блоков 300 МВт – 3,34 МВт и блока 1000 МВт – 16 МВт.

На сцепление с поверхностью оборудования частиц накипи влияют силы адгезии. Причина адгезии заключается в молекулярном притяжении контактирующих фаз или их химическом взаимодействии. Обработка в координатах $\ln(F) = f(d)$ экспериментальных данных позволила получить уравнение зависимости сил адгезии

от размера частиц.

Наиболее широко используемые технологии снижения интенсивности загрязнения трубчатых теплообменных поверхностей включают: увеличение скорости потока; периодическое изменение направления потока; влияние на степень шероховатости теплообменных поверхностей или выбор типа материалов теплопередающих поверхностей; теплообмен в псевдооживленном слое материала; применение пульсирующего потока; применение турбулизаторов потока; подача очищающих материалов (например, шариков из губчатой резины) через трубы теплообменника; воздействие на свойства воспринимающей тепло среды (обработка или очистка среды).

Преобладающим типом накипи в системах ТЭС является карбонат кальция. Последний может кристаллизоваться в двух формах кальция и арагонита. На переход из одной формы в другую влияют присутствующие в растворе ионы других металлов. Тип кристаллов, образующихся на поверхности теплопередачи, зависит от температуры нагрева воды. Когда меняется тип кристаллов, всегда увеличивается индукционный период кристаллизации. В соответствии с экспериментальными данными были произведены расчеты по определению количества отложений на поверхности нагрева.

ГЕНЕРАЦИЯ ЭНЕРГИИ, ТОПЛИВО, ЗАТРАТЫ, НАКИПЕОБРАЗОВАНИЕ, КОНДЕНСАТОРЫ ТУРБИН, КАРБОНАТНЫЙ ИНДЕКС

S. P. Vysotskiy, V. S. Cherman
Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makeevka
Energy Generation and Prevention of Scale Formation

Energy generation at the thermal power plants is associated with the use of water as a heat carrier. Despite the use of various technologies for water purification, the residual amount of contamination causes the formation of deposits on the heat transfer surfaces.

The presence of deposits, in turn, enhances the corrosion processes due to the appearance of differential aeration steam, and also causes the under-generation of electricity and an increase of the specific energy consumption for its generation. Thus, the power loss for modern power units with a decrease in the vacuum in the condenser by only 0.01 ata (as a result of the condenser tubes contamination) for 200 MW units is 1,96 MW, 300 MW units – 3,34 MW and 1000 MW units – 16 MW.

The adhesion of the scale particles to the equipment surface is influenced by the adhesion forces. The reason for adhesion is the molecular attraction of the contacting phases or their chemical interaction. Processing in coordinates $\ln(F) = f(d)$ of the experimental data made it possible to obtain the equation for the dependence of the adhesion forces on the particle size.

The most widely used technologies for reducing the contamination intensity of the tubular heat exchange surfaces include: the increase of the flow rate; the periodic change in the direction of flow; the influence on the roughness degree of the heat exchange surfaces or the choice of the material type for the heat transfer surfaces; the heat exchange in the fluidized bed of the material; the pulsating flow use; the use of the flow turbulators; the supply of cleaning materials (for example, sponge rubber balls) through the heat exchanger tubes; the impact on the properties of the heat-receiving medium (the medium treatment or purification).

The calcium carbonate is the predominant type of the scale in the thermal power plants. The latter can be crystallized in two forms of the calcium and aragonite. The transition from one form to another is influenced by the ions of other metals present in the solution. The crystal type forming on the heat transfer surface depends on the temperature at which the water is heated. When the type of crystals changes, the induction period of crystallization always increases. In accordance with the experimental data, calculations were made to determine the amount of deposits on the heating surface.

ENERGY GENERATION, FUEL, COSTS, SCALE FORMATION, TURBINE CONDENSERS, CARBONATE INDEX

Сведения об авторах:

С. П. Высоцкий

SPIN-код: 7497-0100
Scopus Author ID: 7004891012
ORCID ID: 0000-0002-2988-7245
Телефон: +38 (071) 391-35-97
Эл. почта: sp.vysotsky@gmail.com

В. С. Черман

Телефон: +38 (071) 506-58-14
Эл. почта: 41dpsch@gmail.com

Статья поступила 19.11.2020

© С. П. Высоцкий, В. С. Черман, 2020

Рецензент: М. В. Коновальчик, канд. техн. наук, АДИ ГОУВПО «ДОННТУ»