

С.Е.Сакипова

Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ НАКИПНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ НА ТЕПЛООБМЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ И ТЕХНОЛОГИЯ ИХ РАЗРУШЕНИЯ

Жылуалмасу бетіндегі әр түрлі химиялық құрылымындағы қатты қақтардың пайда болуының жағдайлары және олардың негізгі жылулық қасиеттері зерттелді. Қақтардың құрылымы Tescan Vega II электрондық микроскоп көмегімен анықталды. Электрогидравликалық әдіспен қақтарды жару технологиясының сипаттамасы келтірілді.

The problem of removal of firm scales is actual for all areas of the industry where heat exchange equipment is used. Scales are strong enough, they difficultly leave mechanical by or with use of chemically active substances. Practice shows, that the most effective is the electropulse method of clearing of heat exchange surfaces from the firm adjournment, based on use of the high-voltage electric category in a liquid. For development of methods of perfection and decrease in power consumption of electrohydraulic clearing evolution of formation of structure and the mechanism of growth of a scum is investigated. The basic are studied warmly physical properties and structure of a scum by means of electronic microscope Tescan Vega II. It is received, that the value of the fractal dimensions of structure of the scales, equal 1,6-1,7. Results of the lead researches allow to develop effective methods of removal of a scum and to develop measures on prevention of it's formation.

Проблема удаления твердых накипных отложений актуальна для всех областей промышленности, где используется теплообменное оборудование. Накипные отложения достаточно прочны, они трудно удаляются механическим путем или с использованием химически активных веществ. Практика показывает, что наиболее эффективным является электроимпульсный метод очистки теплообменных поверхностей от твердых отложений, основанный на использовании высоковольтного электрического разряда в жидкости. Электрические разряды в воде могут быть осуществлены с помощью сложного оборудования при высоких напряжениях $\sim(1,5\div 30)$ кВ. Для разработки методов совершенствования и снижения энергоемкости электрогидравлической очистки необходимо изучить эволюцию структурообразования и механизм роста накипных отложений.

Динамика структурообразования накипных отложений

При длительной эксплуатации на внутренних поверхностях теплообменного оборудования неизбежно образуются накипные отложения, которые вызывают ухудшение теплопередачи и связанное с ним увеличение пережога топлива; при большой толщине накипи происходит также нарушение циркуляции воды. Различные примеси, содержащиеся в нагреваемой и испаряемой воде, как правило, образуют твердую фазу на внутренних поверхностях парогенераторов, испарителей, подогревателей и конденсаторов паровых турбин в виде накипи, а внутри водяной массы — в виде взвешенного шлама. Провести четкую границу между накипью и шламом нельзя, так как вещества, отлагающиеся на поверхности нагрева в форме накипи, могут с течением времени превращаться в шлам и, наоборот, шлам при некоторых условиях может прикипать к поверхностям нагрева, образуя накипь. Из элементов парогенератора загрязнению внутренних поверхностей больше всего подвержены обогреваемые экранные трубы [1]. Образование отложений на внутренних поверхностях парообразующих труб влечет ухудшение теплопередачи и, как следствие, перегрев и повреждение металла, сопровождающиеся появлением трещин и разрывом труб. Наряду с рыхлыми пористыми отложениями, подобными пемзе, встречаются отложения, которые по твердости и прочности связи с металлом напоминают эмаль.

По составу образующиеся в парогенераторах отложения по химическому составу могут быть подразделены на три основные группы: щелочноземельные; железные; медные. На внутренней поверхности экранных труб в зонах наибольших температур, с высокими местными тепловыми нагрузками, откладываются в основном железистоокисные накипи. Согласно современным представлениям накипь и шлам образуются в результате физико-химических процессов, из которых основным является процесс кристаллизации, характеризующийся выделением твердой фазы из многокомпонентных растворов. Сначала на отдельных участках поверхности металла отлагаются первичные зародышевые кристаллы, которые затем укрупняются и разрастаются. Образование на поверхности металла первичных кристаллов накипи, являющихся связующим звеном между металлической стенкой и слоем твердых отложений, обуславливается наличием шероховатости. Многочисленные бугорки на по-

верхности представляют собой центры кристаллизации твердой фазы, поверхность нагрева покрывается как бы цементирующей прослойкой. Кинетика роста накипных отложений зависит от вида теплоносителя, характера его движения, материала и рельефности поверхности, условий теплообмена через стенку, но при этом образование слоя накипи всегда начинается с локальных центров кристаллизации. Вероятно, это связано с особенностями образования новой фазы, так как по различным химико-механическим причинам не все частицы из раствора, достигшие поверхности, способны закрепиться на ней. Могут быть участки поверхности с преобладанием сил отталкивания. У частицы, даже при достижении поверхности, может оказаться недостаточно энергии для закрепления на ней: при ударе частице передается энергия, которой не хватает для изменения положения частиц на поверхности. Предположив, что рельефность поверхности при накипеобразовании влияет и на массоперенос, запишем уравнение для скорости образования отложений в виде

$$dn/d\tau = \gamma(\delta)\beta, \quad (1)$$

где γ — кинетическая характеристика процесса образования отложений (коэффициент скорости накипеобразования), $1/c$; δ — толщина слоя отложений, м; β — объемная безразмерная концентрация; n — безразмерная поверхностная концентрация; τ — время накипеобразования.

Величину $\gamma(\beta)$, учитывая ее малость, можно представить как

$$\gamma(\beta) = \gamma_0 \pm A\delta, \quad (2)$$

где A — постоянная при разложении функции в ряд.

Рассчитать поверхностную плотность и толщину отложений можно в том случае, если известен коэффициент скорости накипеобразования. Среднюю толщину слоя накипи δ можно выразить через характеристику рельефности поверхности — амплитудное значение выступов-впадин α . В [1] показано, что

$$\alpha = L\sqrt{\delta}, \quad (3)$$

где L — коэффициент пропорциональности.

При накипеобразовании решающая роль принадлежит диффузионным процессам. Это означает, что для уменьшения накипеобразования на поверхностях необходимо стремиться уменьшить значения коэффициента диффузии и соответственно коэффициента скорости процесса накипеобразования γ .

Как правило, частицы, образующие накипь, поступают на поверхность из водного раствора диффузионным путем, вязкостным — при переносе импульса, а также естественной и вынужденной конвекцией. При кипении роль естественной конвекции не существенна. Процесс образования накипи протекает медленно, но так как решающая роль принадлежит диффузионным процессам, для уменьшения накипеобразования на поверхностях необходимо уменьшить коэффициент диффузии.

Возможности прямого влияния на коэффициент диффузии ограничены. В неограниченном объеме коэффициент диффузии зависит от температуры и радиуса диффундирующей частицы, поэтому для уменьшения коэффициента диффузии необходимо понижать температуру и увеличивать вязкость среды. Коэффициент диффузии можно уменьшить и гидродинамическим путем, для чего на стенках труб необходимо создать условия, при которых гидродинамические потоки от стенки препятствовали бы распространению фронта концентрации к стенке. К примеру, можно закрутить поток, используя соответствующие устройства, или усилить поток газовых пузырей от стенки навстречу диффузионному потоку частиц накипи. Если «оттеснить» от стенки трубы диффундирующие к ней частицы накипи, то они будут снесены гидродинамическим потоком, что приведет к уменьшению отложений на поверхностях. Перечисленные профилактические методы уменьшают рост накипи, но не могут полностью исключить ее образование. Практика показывает, что в первую очередь разрушаются преимущественно более толстостенные отложения, а для удаления тонкослойных отложений требуется больше энергетических затрат.

Структура и свойства накипных отложений. Исследование эволюционных изменений состава и структуры накипи состава на поверхностях теплообмена необходимо для прогнозирования их теплофизических свойств, а также для правильной оценки их влияния на эффективность работы оборудования. Накипные отложения были исследованы методом электронного зондирования, при этом поверхность образца облучается тонко сфокусированным электронным лучом. Изучение поверхности накипных отложений проводилось с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) Tescan Vega II, возможности увеличения которого достигают 10^6 раз. Изображение обычно формируется с помощью вторичных электронов, зона выхода которых ограничена малой областью вокруг зонда, что

обеспечивает высокую разрешающую способность и позволяет исследовать мельчайшие детали рельефа поверхности.

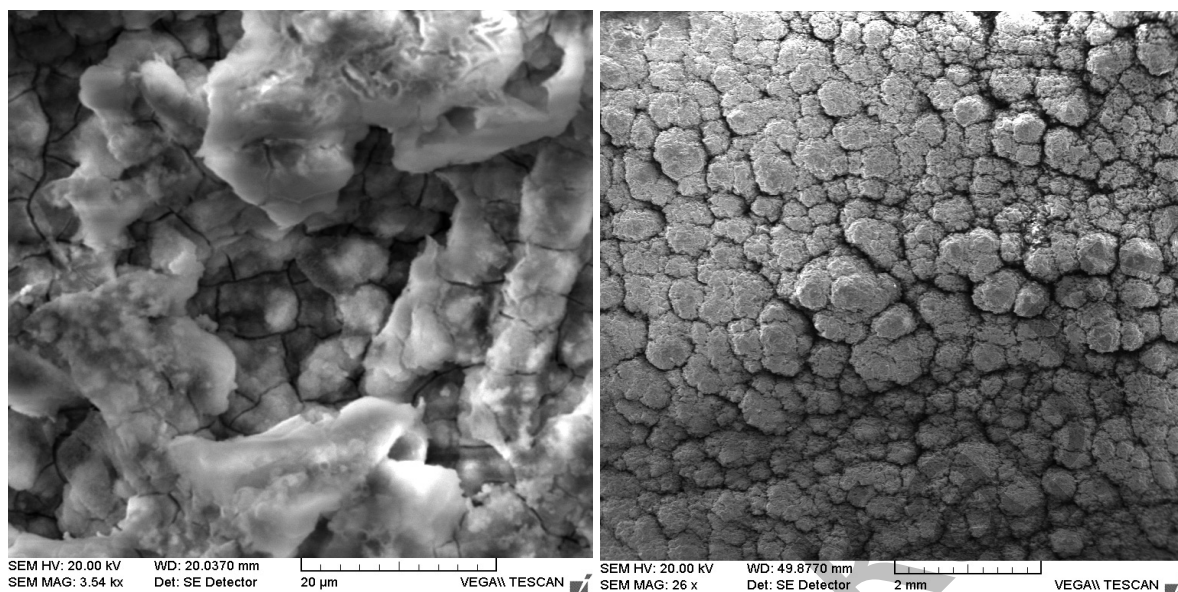


Рис. 1. Накипные отложения, полученные на нагреваемых поверхностях, омываемых: *а* — водой из городской сети; *б* — специальным раствором

Визуальные исследования структуры накипи на сколах и срезах свидетельствуют о формировании накипных отложений трех структурных типов: комкового, кристаллического и смешанного. Отложения комкового типа состоят из коллоидных шаров; они характерны для систем технического водоснабжения с высоким содержанием солей. Сканирование накипи проводилось в свете вторичных и отраженных электронов при высоких напряжениях. С помощью РЭМ изучены два вида накипи: естественная накипь и искусственно полученные в лаборатории отложения. Размер зонда (размер пучка электронов) при сканировании составлял 96,0 нм. На рисунке 1 можно увидеть, что поверхность искусственно полученных отложений имеет гладкую форму, структура их более однообразна. Видно, что комковая структура постепенно переходит в кристаллическую, это подтверждает смешанную структуру накипи [2]. Полуколичественный химический состав проводился с помощью энергодисперсионного анализатора INCA. Получены спектрально-картографические изображения отложений и численные значения концентрации химических элементов.

При исследовании отложений, полученных в лаборатории, четко видна начальная фаза созревания отложений, имеющих более ровную поверхность, затем она как бы растрескивается и обретает либо комковую, либо кристаллическую структуру. Комковая структура повторяется по поверхности в различных местах. Проведенный с помощью РЭМ Tescan Vega II спектрально-картографический анализ поверхности позволил вычислить фрактальную размерность накипных структур, меняется между 1 и 2 в зависимости от условий образования накипи. Для исследуемых образцов получено некоторое среднее значение фрактальной размерности, равное 1,6–1,7. Результаты спектрально-полуколичественного анализа о химическом составе отложений воды из городской сети и искусственных отложений приведены в таблице, откуда следует, что в состав накипи входит углерод, кислород, кальций. В накипи городской воды присутствует хлор и в достаточно большом количестве магний.

Исследования микроструктуры отложений, образовавшихся на внутренней поверхности труб теплообменников, использующих в качестве теплоносителя воду из водозабора города Караганды, показали, что для них характерна структура комкового типа. Отложения как бы состоят из чередующихся комков и пор, кристаллы комков имеют в основном ромбовидную форму. Образующиеся в структуре отложений пустоты заполнены водой, а также растворенными в воде газами и водяным паром. Таким образом, состав накипных отложений можно считать трехкомпонентным: карбонаты, вода и парогазовая смесь. Коэффициент теплопроводности накипи меняется в пределах $1,06 \div 1,22$ Вт/(м·К), с ростом температуры ее теплопроводность увеличивается, но теплопроводные свойства воды и воздуха в порах значительно хуже, чем накипи и металла.

Результаты спектрально-полуколичественного анализа

Химический элемент	Процентное количество, %	
	в естественной накипи	в лабораторных образцах
C	16,52	33,62
O	55,92	56,26
Na	3,68	3,68
Mg	12,43	1,60
Si	0,75	0
S	2,60	0,07
Cl	3,41	0
Ca	1,95	6,29
Cu	1,65	0,03
Zn	1,10	0
Fe	0	0,12
Ta	0	0
Итоги	100,00	100,00

Методика электрогидравлической очистки

Для очистки теплообменников от накипных отложений успешно применяется высоковольтный электрический разряд в жидкости, как экологически чистый и мощный источник механической энергии с высоким коэффициентом полезного действия. Электрогидравлический эффект представляет собой электрический взрыв в жидкости с практически мгновенным выделением энергии в заданной точке [3]. Количество и скорость выделяемой кинетической и тепловой энергии в зоне электрического разряда, зависит от многих причин, но в основном от параметров электрического разряда и свойств жидкости. При этом волну сжатия в жидкости, возникающую при интенсивном испарении жидкости в зоне разряда и расширении пара в электродуговом промежутке, можно вызвать как одиночным, мощным импульсным электрическим разрядом между электродами, помещенными в жидкость, так и последовательной серией импульсов. Источником разрушения твердых отложений при электрогидравлической очистке являются мощные импульсные давления на фронте ударных волн, которые образуются при подводном электрическом разряде. Установлено, что в первую очередь разрушаются преимущественно более толстые отложения, а для разрушения тонкослойных отложений требуется увеличивать подаваемую энергию разряда.

Способ очистки от различного рода сверхтвердых и твердых отложений, образующихся на внутренней поверхности труб, описанный в [3], разработан для трубчатых конструкций технологического оборудования. При электрическом разряде в неограниченном пространстве энергия ударной волны распространяется во все стороны, изотропно, с помощью ограничивающих твердых стенок может концентрироваться в одном направлении. Для повышения эффективности очистки труб теплообменных аппаратов с твердыми и сверхтвердыми отложениями в очищаемую трубку вводится кабель-электрод, помещенный в подвижный конусный насадок, который может обеспечить увеличение давления ударной волны. Это явление связано с эффектом кумуляции — усилением давления ударной волны в одном направлении, т.е. с эффектом концентрации энергии.

Эксперименты показывают, что с помощью конических отражателей можно получить усиление мощности ударной волны, причем наибольшая эффективность была зафиксирована при использовании конического насадка с углом конусности $\alpha=30^\circ$. На рисунке 2 приведена схема очистки поверхностей теплообменников от твердых и сверхтвердых отложений. Конический насадок изготовлен из стали толщиной (1,0÷1,5) мм. Диаметр конуса меньше внутреннего диаметра очищаемой трубы. Внешний диаметр конуса на 4÷5 мм меньше, чем внутренний диаметр трубы теплообменника. Усиленная кумулятивным эффектом ударная волна способствует быстрому отслаиванию находящихся на внутренней поверхности трубы твердых и сверхтвердых отложений толщиной ~3 мм.

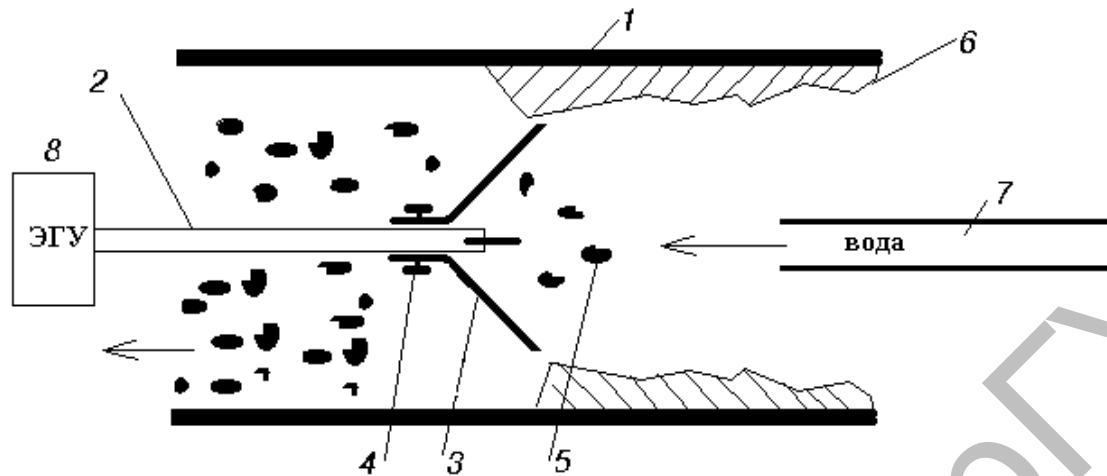


Рис. 2. Схема электрогидравлического способа очистки: 1 — стенка очищаемой трубы; 2 — кабель-электрод; 3 — конусная вставка; 4 — крепление; 5 — разрушенные отложения; 6 — очищаемый слой накипи; 7 — техническая вода; 8 — электрогидравлическая установка

Периодическое действие мощной ударной волны и высокоскоростных струек жидкости на обрабатываемую поверхность усиливает разрушение твердых и сверхтвердых отложений, тем самым интенсифицируя процесс очистки внутренней поверхности трубы теплообменника. Разрушенные отложения удаляются из рабочей зоны обратным потоком жидкости. Предлагаемый способ очистки труб от отложений может быть реализован при очистке пучков труб пиковых бойлеров ТЭЦ, паровых котлов и др. с твердыми отложениями толщиной не более 3мм. При оценке разрушающей способности высоковольтного разряда в воде следует учитывать динамическую прочность разрушаемого объекта, законы его движения под действием импульсной нагрузки, сжимаемость и акустическое сопротивление материала, взаимодействие волн сжатия и растяжения. Для искрового разряда в водной среде характерно образование энергии высокой плотности ($10^8 \div 10^9$) Дж/м³, сопровождающейся резким повышением давления и температуры, в определенном объеме (канале разряда) за малый промежуток времени ($10^{-4} \div 10^{-5}$) с.

Быстрому расширению канала ($10^2 \div 10^3$) м/с под действием высокого давления и температуры сопутствует излучение импульса сжатия в окружающей среде, который и используется для получения различного рода деформаций: деформации разрушения, формообразования и колебаний упругих систем и конструкций.

Исследование динамики развития проводящего канала разряда требует изучения свойств низкотемпературной плазмы и сопровождающих его гидродинамических явлений. В [2] показано, что закон расширения границы полости разряда полностью определяется термодинамическими свойствами среды и режимом выделения мощности электрической энергии. В расчетах необходимо учитывать то, что на практике при электрогидравлической обработке дисперсных сред и минералов в качестве рабочей среды часто используется техническая вода, которая всегда содержит пузырьки воздуха или примеси. Содержание воздуха или примесей незначительно и практически не меняет ее плотность, но при импульсном воздействии способствует сильному изменению ее структурных свойств. Поэтому необходимо использовать уравнение политропного процесса, значения показателя политропы и мощности выделяемой энергии $N(t)$ уточняются из экспериментов. Необходимо также учесть и влияние геометрии рабочего канала, в котором происходит электрический разряд из-за возможной кумуляции энергии давления в заданном направлении.

Давление в ударной волне убывает со временем по экспоненциальному закону и с расстоянием r от полости по сложному закону. Согласно расчетам для достижения давления ударной волны, достаточного для разрушения хрупкой оболочки, необходимо создание внутреннего напряжения $\sigma_{экр}$, равного

$$\sigma_{экр} = 0,1 E, \quad (4)$$

где E — модуль Юнга материала слоя.

Большая скорость распространения ударной волны позволяет считать время достижения волной различных точек оболочки на круговом сечении одним и тем же. Разрушающее напряжение зависит от вязкости слоя, которая определяется структурой накипи, размером трещин и др. При учете конфигурации и неоднородности накипного слоя оказывается, что разрушающее напряжение может быть почти в 2 раза меньше, чем (4), но распределение давления на различные точки слоя будет неравномерным. Учитывая, что ~20 % подаваемой энергии разряда расходуется на создание разрушающего давления, можно по данным о структуре и составе накипных отложений определить необходимые параметры электрогидравлической установки.

Заключение

Для эффективного решения проблемы необходимо знание не только причин и условий ее образования, но и механизма и кинетики роста, а также комплексное исследование структуры и теплофизических свойств накипных отложений различного химического состава на поверхности нагрева и т.д. Результаты проведенных исследований позволяют выработать эффективные методы удаления накипных отложений и разработать меры по предотвращению образования накипи.

Список литературы

1. Бубликов И.А. Структурные особенности и теплофизические свойства внутритрубных отложений на теплообменных поверхностях в системах технической воды // Теплоэнергетика. — 1978. — № 2. — С. 30–34.
2. Кусаиынов К., Сакипова С.Е., Бакенов Н. Эволюция структурообразования накипи на теплообменных поверхностях // ФиПС-08 «Прикладная синергетика в нанотехнологиях»: Сб. тр. 5-го междунар. междисциплинарного симпозиума. — М.: МАТИ, 2008. — С. 191–195.
3. Жанабаев З.Ж., Кусаиынов К. и др. Способ очистки труб от твердых и сверхтвердых отложений / Предпатент Республики Казахстан на изобретение № 12247 от 19.03.2001.