

Член-корреспондент АН СССР М. А. СТЫРИКОВИЧ и Е. А. КАЗАКОВА

К ВОПРОСУ О МЕХАНИЗМЕ ОТЛОЖЕНИЯ СОЛЕЙ НА ПОВЕРХНОСТИ НАГРЕВА ПРИ ИНТЕНСИВНОМ ПАРООБРАЗОВАНИИ

С переходом на мощные котлы высокого давления, характеризующиеся большими тепловыми напряжениями поверхностей нагрева, практика столкнулась с новым неприятным явлением — временным исчезновением из котловой воды некоторых легко растворимых солей (сульфата, фосфата и силиката натрия). Было замечено периодическое снижение содержания этих солей в воде с повышением нагрузки котлоагрегата и обратное их появление в растворе при уменьшении нагрузки или остановке котла.

Для объяснения выпадения легко растворимых солей, содержание которых в котловой воде в 100—300 раз ниже, чем концентрация насыщения, Холл (1) несколько лет тому назад выдвинул своеобразную гипотезу протекания процесса в парогенерирующих трубах. Свои воззрения Холл базирует на более ранней теории Отто (2), объяснявшего образование накипи непрерывным испарением воды, находящейся под паровым пузырьком у самой поверхности нагрева, и на опытах Партриджа и Уайта с насыщенным раствором гипса. Холл предполагает, что в условиях интенсивного парообразования у поверхности нагрева может происходить весьма сильное выпаривание котловой воды, в результате чего в пограничном слое будет достигаться концентрация насыщения, а на греющей стенке отлагаться соль.

Однако известно, что отчетливые следы накипи Партридж и Уайт получили только при кипении насыщенного раствора. Кроме того, и Отто и Холл представляют себе паровой пузырек, образующийся при кипении, как полушар с большой площадью соприкосновения с поверхностью нагрева, в то время как в действительности пузырьки сидят на весьма тонких ножках с ничтожной площадью касания. Из опытов Л. М. Зысиной (4) по механизму парообразования известно, что пузырьки пара возникают и отрываются с большой частотой (порядка 40—60 пузырьков в секунду), причем после каждого отрыва поверхность под пузырьком омывается свежей порцией воды. По мере повышения тепловой нагрузки турбулизация пограничного слоя возрастает, а следовательно, омывание поверхности нагрева подтекающей водой должно усилиться. С ростом давления, хотя диаметр и частота отрыва пузырей уменьшаются, но число центров парообразования резко возрастает и интенсивность теплообмена значительно увеличивается.

Все эти соображения побудили одного из авторов настоящей статьи высказать предположение о малой вероятности столь значительного повышения концентрации растворов в пограничном слое у поверхности нагрева, как это представляется Холлу. Излагаемая ниже работа пред-

ставляет собой экспериментальную проверку высказанных предположений.

Исследование было проведено при атмосферном давлении и при давлении в 32 и 59,5 атм. Опыты при атмосферном давлении были поставлены в горизонтальном стеклянном аппарате, погруженном, во избежание потерь тепла в окружающую среду, в ванну с кипящей водой. В качестве поверхности нагрева служила горизонтально расположенная платиновая проволока с $d = 0,15$ мм и тонкостенная трубка из нержавеющей стали с $d_{нар} = 1,5$ мм, обогреваемые электрическим током. Температура платиновой проволоки определялась с помощью специально

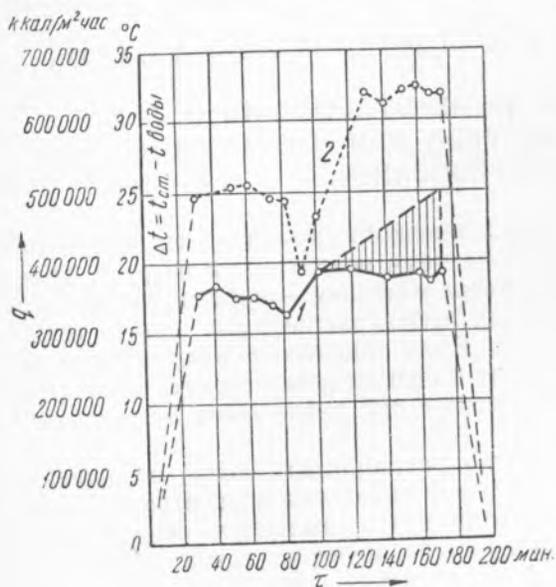


Рис. 1. Исследование условий отложения солей при кипении раствора Na_2SO_4 (20 000 мг/л) в большом объеме под атмосферным давлением.
1 — $\Delta t = f(\tau)$, 2 — $q = f(\tau)$

вытые потоки достигали 1 500 000—2 000 000 ккал/м²·час.

Опыты под давлением были проведены в стальном аппарате высокого давления, снабженном холодильником для обратного стока конденсата (5). Специальные нагреватели на наружном кожухе и система вмонтированных термопар обеспечивали поддержание надлежащего режима температуры и давления. Кипение раствора производилось на поверхности горизонтальной платиновой проволоки, обогреваемой электрическим током. Тепловые напряжения подымались до 1 500 000—2 000 000 ккал/м²·час. Кипятились растворы сульфата натрия с концентрацией 1000 и 5000 мг/л. Результаты исследования представлены на рис. 1, 2 и 3.

На рис. 1 нанесены изменения тепловой нагрузки и температурного напора во времени для раствора сульфата натрия с концентрацией 20 000 мг/л. Кривые со всей очевидностью показывают, что на протяжении опыта соль на поверхность нагрева не оседала. Для наглядности вертикальной штриховкой показано, насколько должен был измениться температурный напор, если бы на стенке стала отлагаться соль. Осадок толщиной в 0,02 мм должен был бы вызвать повышение температуры стенки на 5—6°. Аналогичные кривые были получены для растворов других концентраций Na_2SO_4 , вплоть до 100 000 мг/л, что составляет уже около 40% от насыщения. Повышение тепловых нагрузок вплоть

разработанной мостовой схемы по изменению электросопротивления, причем измерение сопротивления производилось при одновременном прохождении через проволоку переменного тока, предназначенного для ее обогрева; температура стенки трубки — по показанию тончайшей термопары, вводимой внутрь трубки в стеклянных капиллярах.

При атмосферном давлении кипятились растворы сульфата натрия с концентрацией 1000, 5000, 20 000 и 100 000 мг/л и насыщенный (при $t = 100^\circ$) раствор гипса. В большинстве опытов тепловая нагрузка доходила до 500 000—600 000 ккал/м²·час, что превышает нагрузки, имеющие место в паровых котлах. В отдельных опытах удельные тепло-

до 2 000 000 ккал/м²час также не вызвало отложения солей. Поверхность нагрева неизменно оставалась чистой.

На рис. 2 приведены результаты опытов под давлением в 32 и 59,5 атм. Для этих опытов, ввиду значительной электропроводности раствора, определение абсолютной температуры проволоки по электропроводности могло страдать значительной неточностью. Поэтому на рис. 2 на оси ординат отложено сопротивление проволоки, непосредственно измеренное на опыте, а вертикальной штриховкой приближенно показано, на сколько оно должно было бы возрасти в случае отложения осадка толщиной до 0,02 мм. Кривые рис. 2 также указывают на полное отсутствие отложения.

Наконец, для того, чтобы убедиться в чувствительности примененного нами метода к обнаруживанию тончайших отложений солей на поверхности нагрева, на платиновой проволоке был проведен опыт сначала с дистиллированной водой, а затем с насыщенным раствором гипса.

На рис. 3 представлены результаты первой половины этого опыта. Уже при относительно небольших нагрузках на проволоке началось заметное отложение, интенсивность которого возрастала по мере возрастания нагрузки. Так, если при нагрузке в 120 000—150 000 ккал/м²час скорость нарастания осадка была 0,03 мм/час, то для теплового потока порядка 300 000 ккал/м²час эта величина возросла до 0,15 мм/час. Попутно с отложением соли резко возрастала температура проволоки; так например, при отложении толщиной в 0,1 мм температура проволоки была 140° вместо 118° для чистой поверхности при $q = 120\ 000$ ккал/м²час. В конце опыта, при толщине осадка в 0,35 мм, температура проволоки при $q = 250\ 000$ ккал/м²час возросла до 300°.

Представляется существенным, что наблюдаемое нами отложение соли происходило по всей поверхности проволоки, а не только около центров парообразования (при $q = 100\ 000$ —150 000 ккал/м²час число центров было только 3—5 на всю длину проволоки в 40 мм), как это предполагалось Холлом.

Из изложенного следует:

1. При кипении в большом объеме растворов, по концентрации далеких от насыщения, при тепловых напряжениях, во много раз превышающих обычные нагрузки паровых котлов, ни при атмосферном давлении, ни при 30 и 60 атм. соли на поверхности нагрева не отлагаются.

2. Из раствора, весьма близкого к насыщению, имеет место активное отложение солей, интенсивность которого растет с увеличением тепловой нагрузки поверхности нагрева.

3. При относительно небольших тепловых потоках и редких центрах парообразования выпадение солей наблюдается по всей поверхности нагрева вне зависимости от места образования паровых пузырей.

4. Полученные результаты подтверждают предположение о том, что отложения легко растворимых солей, наблюдаемые в паровых котлах высокого давления, не являются результатом значительного повышения концентрации котловой воды в пограничном слое за счет весьма интен-

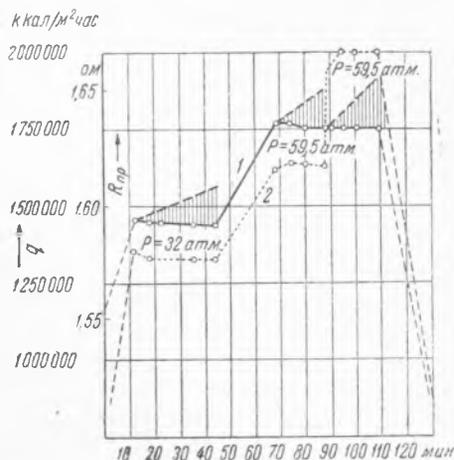


Рис. 2. Исследование условий отложения солей при кипении раствора Na_2SO_4 (1000 мг/л) в большом объеме под давлением. 1 — $R_{пр} = f(\tau)$, 2 — $q = f(\tau)$

сивного парообразования, как предполагается гипотезой Холла. Повидимому, основной причиной, вызывающей эти отложения, следует считать неблагоприятные гидродинамические условия омывания внутренней поверхности нагрева кипяtilьных труб, возникновение которых обычно

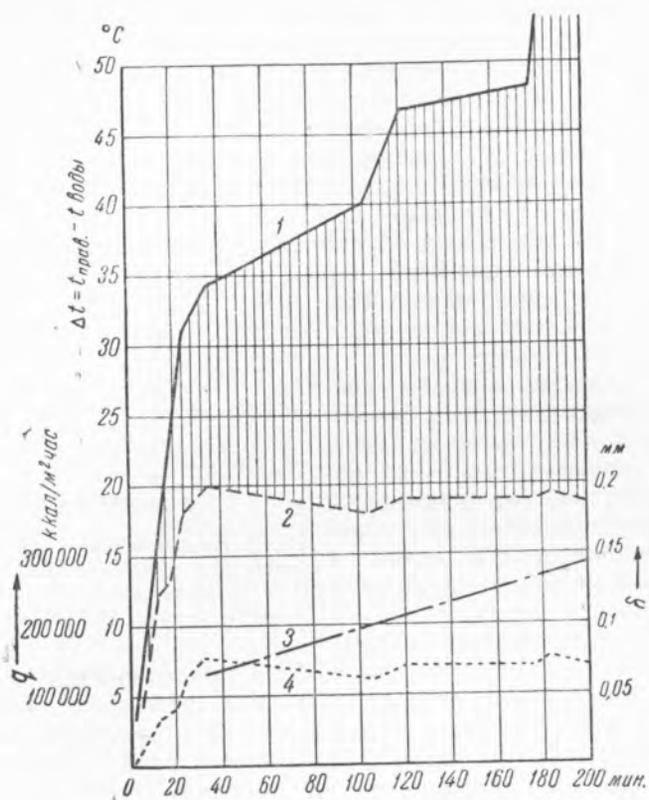


Рис. 3. Отложение гипса на поверхности нагрева при кипении насыщенного раствора под атмосферным давлением. 1 — $\Delta t_{\text{осад}} = f(\tau)$, 2 — $\Delta t_{\text{чист. пов}} = f(\tau)$, 3 — $\delta_{\text{осад}} = f(\tau)$ для $q = 120\,000 \div 150\,000$, 4 — $q = f(\tau)$ (q определен с учетом увеличения поверхности, происшедшего за счет отложения солей)

бывает связано с теми или иными дефектами в циркуляции воды в паровых котлах.

Поступило
19 VIII 1949

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ R. E. Hall, Trans. ASME, 66, № 5, 458 (1944). ² W. Otto, Mitteil. d. Vereins d. Grosskesselbesitzer, No. 17 (1928). ³ E. P. Partridge and White, Am. Soc. Mach. Eng., 1929, Rochester Meeting (отд. оттиск). ⁴ С. С. Кутателадзе, Теплоотдача при конденсации и кипении, 1949. ⁵ Е. А. Казакова, Изв. АН СССР, ОТН, № 1 (1949).