

И.Г. Дьяков, С.Ю. Шадрин, П.Н. Белкин

ОСОБЕННОСТИ АНОДНОГО НАГРЕВА ПРИ ДВИЖЕНИИ ЭЛЕКТРОЛИТА В РЕЖИМЕ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ

*Костромской государственной университет им. Н.А. Некрасова,
ул. 1 Мая, 14, г. Кострома, 156961, Россия*

Введение

Проблемой анодной химико-термической обработки является стабилизация температуры детали-анода, связанная с перегревом рабочего электролита в прианодной области. Для устранения этого перегрева в стандартных гидродинамических схемах применяется вертикальное обтекание обрабатываемой детали с переливом электролита через верхний край рабочей камеры, обычно имеющей форму цилиндрического сосуда. Перегретый раствор электролита поступает в теплообменник для охлаждения до приемлемой температуры и после этого подается в рабочую камеру. В данной схеме воспроизводимость результатов измерений при выполнении научных исследований или качество обработки партии деталей в производственных условиях зависят от стабильности работы насоса, не всегда удовлетворительной.

Ранее установлено, что устойчивый катодный нагрев возможен в условиях естественной конвекции [1]. Образцы фиксированной длины из латуни, меди, сталей 35 и 40 погружались на различные глубины, при этом их токоподвод изолировался керамической трубкой. Температура электролита составляла 40°C. Согласно большинству публикаций она близка к оптимальной для катодного нагрева, не требующего охлаждения рабочего электролита. В предлагаемой работе предпринята попытка изучения возможностей анодного нагрева для случая свободной конвекции рабочего электролита без его принудительного движения.

Эксперимент

При рассмотрении теплового баланса в стационарных условиях нагрева предполагалось, что теплота, выделяемая в парогазовой оболочке, расходовалась на нагрев электролита и его испарение. Поток тепла из оболочки в анод пренебрегалось. Рабочей камерой служил цилиндрический пластмассовый сосуд диаметром 110 и высотой 255 мм, внутри которого размещался охлаждаемый водопроводной водой теплообменник (двойной змеевик) (рис. 1). Змеевик изготавливался из трубки нержавеющей стали 12Х18Н10Т диаметром 12 мм, общей длиной 6,5 м и подключался к отрицательному полюсу источника питания, то есть служил катодом. Объем рабочего электролита составлял 1,5 л. Составы электролитов – 15% водные растворы хлорида или нитрата аммония. Для приготовления растворов использовались водопроводная вода и химикаты технической чистоты, концентрации растворов определялись денсиметром. Стальные цилиндрические образцы диаметрами 8 и 15 мм погружались в электролит на глубину 10 или 30 мм. Температура нагреваемых образцов измерялась хромель-алюмелевой термопарой, помещенной в глухое осевое отверстие на расстоянии 1 мм от торца образца. Эффективные значения тока и напряжения измерялись амперметром и вольтметром (класс точности 0,5). Температура водопроводной воды на входе и выходе из теплообменника также измерялась хромель-алюмелевой термопарой, подключенной к мультиметру TRZ-80 с классом точности 0,5.

Плотность теплового потока, возникающего в парогазовой оболочке за счёт прохождения через нее электрического тока, определялась следующим образом:

$$q = IU/2\pi Rh, \quad (1)$$

где I – ток, U – напряжение, R – радиус образца-анода, h – глубина его погружения.

Плотность теплового потока из парогазовой оболочки в раствор электролита определялась по разности температур воды ΔT на входе и выходе из теплообменника:

$$q_l = cm\Delta T/2\pi Rht, \quad (2)$$

где c – удельная теплоемкость воды, t – время, за которое фиксированная масса воды $m = 5$ кг прошла через теплообменник.

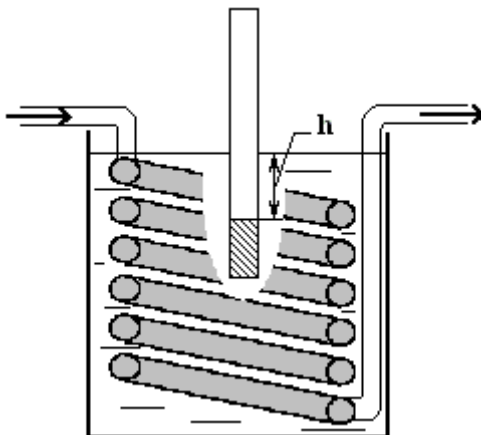


Рис. 1 Рабочая камера с вертикальным нагреваемым анодом и змеевиком-теплообменником (стрелками показано движение охлаждающей воды)

Плотность теплового потока, расходуемого на испарение электролита, определялась согласно формуле

$$q_s = \rho\psi\Delta V/2\pi Rht, \quad (3)$$

где ρ – плотность раствора, ψ – удельная теплота его парообразования, ΔV – изменение объема электролита за указанное выше время t . Объем электролита измерялся мензурками с точностью 1 мл, для уменьшения ошибки измерений перед началом эксперимента рабочая камера вместе с теплообменником смачивались электролитом. Продолжительность нагрева измерялась секундомером.

Отметим, что стационарное состояние системы достигалось не при всех экспериментах. Поэтому измерения тока и температуры воды на выходе из теплообменника проводились дважды. Вначале после прохождения 1 л воды измерялись ток I_1 и температура воды на выходе из теплообменника T_1 . Повторные измерения тока I_2 и температуры выходящей воды T_2 выполнялись перед окончанием опыта вместе с определением температуры образца-анода T_A . Разность температур воды, выходящей из теплообменника T_1 и T_2 , может служить иллюстрацией приближения к стационарному состоянию. В табл. 1 даны средние данные по двум измерениям. Температура воды на входе в теплообменник $T_0 = 6^\circ\text{C}$.

Таблица 1. Характеристики нагрева образцов диаметром 15 мм, погружённых на 30 мм в 15% раствор хлорида аммония

№ опыта	U , В	T_1 , °С	T_2 , °С	I_1 , А	I_2 , А	T_A , °С	t , с	ΔV , мл
1	120	21,5	40,0	7,0	7,5	590	853	6,5
2	160	19,5	27,0	6,0	7,0	660	459	5,5
3	200	23,3	32,0	6,0	6,5	715	498	9,0
4	240	22,0	27,0	5,5	5,5	780	374	10,0
5	280	22,5	27,0	5,0	5,0	700	352	12,5

При оценке тепловых потоков использовались средние значения тока и температуры воды по двум измерениям, то есть:

$$I = (I_1 + I_2)/2 \text{ и } \Delta T = (T_1 + T_2)/2 - T_0. \quad (4)$$

Скорость испарения раствора хлорида аммония изменялась от 8 до 120 мл/ч пропорционально приложенному напряжению. Линейно зависит от напряжения и соответствующая плотность теплового потока, расходуемого на испарение раствора (рис. 2). Влияние диаметра образца на плотность теплового потока в пределах достигнутой точности ($\pm 1 \cdot 10^4$ Вт/м² при доверительной вероятности 90%) не обнаружено.

Средняя скорость убыли раствора нитрата аммония, составляющая 54 мл/ч, не зависит ни от напряжения, ни от размеров образцов в указанном выше диапазоне изменения условий. Формальный

пересчет потерь раствора в плотность теплового потока, определяющего испарение, дает величины, зависящие только от размеров образцов при всех напряжениях.

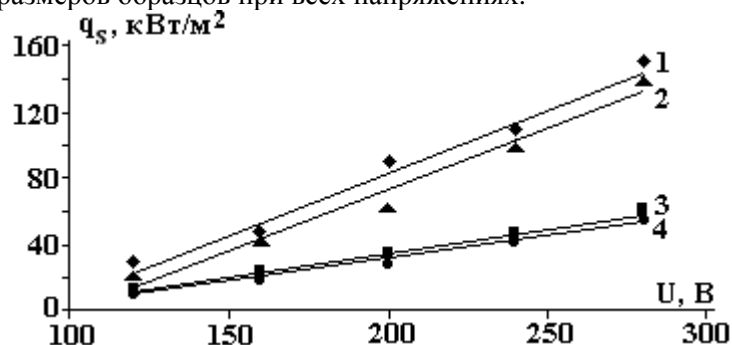


Рис. 2. Влияние напряжения на плотность теплового потока, расходуемого на испарение 15% раствора хлорида аммония. Диаметр образцов, мм: 8 (1; 3) и 15 (2; 4). Глубина погружения образцов, мм: 10 (1; 2) и 30 (3; 4)

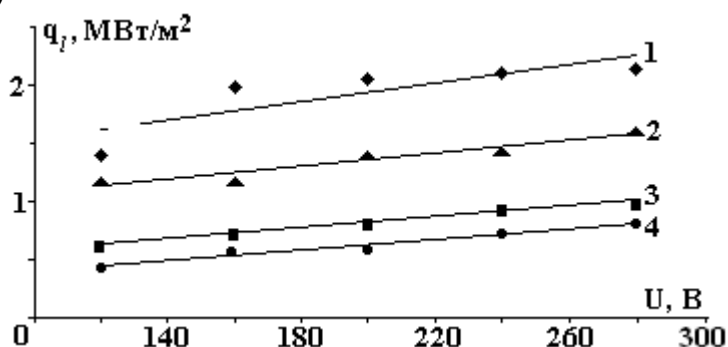


Рис. 3. Зависимость плотности теплового потока из оболочки в раствор (15% хлорида аммония) от напряжения нагрева. Диаметр образца, мм: 8 (1; 3); 15 (2; 4). Глубина погружения, мм: 10 (1; 2); 30 (3; 4)

Таблица 2. Плотности потоков тепла (10^4 Вт/м^2), расходуемого на испарение 15% водного раствора нитрата аммония

Диаметр образца 8 мм	Диаметр образца 15 мм
Глубина погружения 10 мм	
14	7
Глубина погружения 30 мм	
4	2

Доля тепла, затраченного на испарение обоих растворов, даже с учетом оговоренного завышения, не превышает 8% от полной потребляемой мощности. Плотность теплового потока, направленного из парогазовой оболочки в раствор хлорида аммония, зависит как от напряжения, так и от размеров образцов (рис. 3).

Обсуждение результатов

Доля тепла, поступающего в раствор, составляет от 67,3 до 91% общей потребляемой мощности. Эта величина меньше обычно регистрируемой в стационарном состоянии [2], что также указывает на недостаточную стабилизацию нагрева. Абсолютные значения плотностей тепловых потоков, полученные для условий свободной конвекции, составляют $0,43 - 2,14 \text{ МВт/м}^2$ для раствора хлорида аммония, что ниже регистрируемых при обычном анодном нагреве с продольным обтеканием детали ($1,3-2,4 \text{ МВт/м}^2$) [3]. Еще меньшие значения ($0,32 - 1,72 \text{ МВт/м}^2$) получены для раствора нитрата аммония. По нашему мнению, это связано с дополнительным перегревом верхнего слоя электролита при свободной конвекции по сравнению с применяемыми на практике гидродинамическими условиями (продольным вертикальным обтеканием). Иначе говоря, для условий свободной конвекции характерна меньшая степень недогрева жидкости до насыщения, что приводит к заметному снижению тепловых потоков в раствор.

Плотность теплового потока из оболочки в раствор q_l в условиях естественной конвекции может быть аппроксимирована в интервале напряжений 120–280 В следующим выражением:

$$q_l = a + b U, \quad (5)$$

где U – напряжение нагрева, a и b – эмпирические постоянные (табл.3).

Таблица 3. Значения коэффициентов a и b для 15% раствора хлорида аммония (D – диаметр образца, h – глубина его погружения)

D , мм	h , мм	a , МВт/м ²	b , МВ/м ² В
8	10	1,14	0,0040
8	30	0,34	0,0024
15	10	0,81	0,0028
15	30	0,17	0,0023

Аналогичная зависимость, полученная для продольного обтекания цилиндрической детали [3], использовалась в расчете толщины парогазовой оболочки. Это позволило получить расширяющийся вверх профиль, подтвердить зависимость средней толщины оболочки от скорости течения электролита и напряжения нагрева, а также рассчитать вольт-температурную характеристику анодного нагрева, совпадающую с экспериментальными данными в пределах 20 – 25% [4].

Эмпирическая зависимость (5) позволяет оценить толщину парогазовой оболочки при нагреве в условиях естественной конвекции. Если пренебречь затратами энергии на испарение раствора и потоками тепла в анод, то плотность теплового потока из оболочки в раствор q_l будет связана с объемной мощностью источников тепла в оболочке w следующим соотношением:

$$q_l = w\delta, \quad (6)$$

где δ – толщина парогазовой оболочки. Выделение тепла в оболочке связано с прохождением через нее электрического тока плотностью j , откуда

$$w = jU / \delta = \sigma U^2 / \delta^2, \quad (7)$$

где σ – удельная электропроводность парогазовой оболочки. Здесь предполагается, что прохождение тока через оболочку описывается законом Ома и влияние пространственных зарядов не слишком велико. Из (5) – (7) следует, что

$$\delta = \frac{\sigma U^2}{a + bU}. \quad (8)$$

С другой стороны, если пренебречь прохождением тока через утолщенную оболочку на торце анода, то из закона Ома следует, что

$$U = IR = I\delta / \sigma \pi D h, \text{ откуда } \delta = \pi D h \sigma U / I. \quad (9)$$

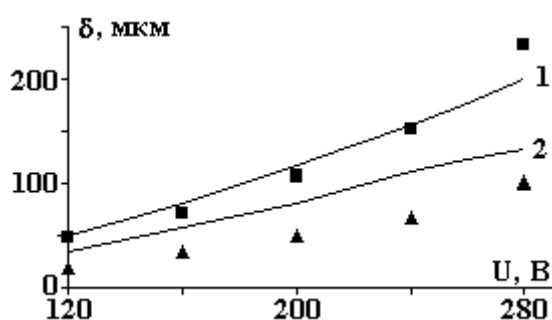


Рис. 4. Зависимость толщины парогазовой оболочки при нагреве в 15% растворе хлорида аммония от напряжения. Диаметр образцов, мм: 1–15, 2–8. Глубина погружения 10 мм. Сплошные кривые – расчет согласно формуле (8); точками изображены значения, соответствующие формуле (9) по результатам измерений тока и напряжения

Выражения (8) и (9) дают возможность оценить зависимость толщины парогазовой оболочки от напряжения двумя способами. Согласно [5] предположим, что удельная электропроводность анодной парогазовой оболочки не зависит от напряжения, и в качестве ее среднего значения примем $\sigma = 4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$. Наилучшее соответствие получено для образцов диаметрами 8 и 15 мм, погружаемых на глубину 10 мм (рис. 4). При глубине погружения всех образцов 30 мм расхождения данных, получаемых по формулам (8) и (9), составляют десятки процентов. Толщина оболочки для глубины погружения 30 мм, определяемая по измерениям тока и напряжения (9), превышает таковую, расчи-

тываемую по плотности теплового потока (8), особенно при больших напряжениях. Такое расхождение может быть вызвано невысокой точностью измерений или существованием пока необнаруженной зависимости электропроводности оболочки от напряжения.

Абсолютные значения толщины парогазовой оболочки при нагреве в условиях естественной конвекции составляют от 20 до 500 мкм по оценкам обоими методами в изученном диапазоне переменных. По теоретическим оценкам для условий продольного обтекания толщина оболочки ~100 мкм и почти не зависит от напряжения, если пренебречь зависимостью коэффициента теплопроводности пара от температуры [4]. Учет этой зависимости приводит к увеличению толщины оболочки от 25 до 45 мкм при изменении напряжения от 140 до 250 В [4]. В обеих моделях использовалась нелинейная зависимость тока от напряжения через парогазовую оболочку, учитывающая роль пространственных зарядов. Другая оценка толщины оболочки также для условий продольного обтекания образца в 13% растворе хлорида аммония дает значения от 10 до 24 мкм при увеличении напряжения от 100 до 250 В [6]. Этот результат также получен на основе нелинейной зависимости тока от напряжения через оболочку, то есть с учетом пространственных зарядов. Кроме того, здесь использовались оценочные значения подвижности ионов хлора и напряженности поля в оболочке, равной $5 \cdot 10^6$ В/м. Очевидное превышение толщины парогазовой оболочки при анодном нагреве в условиях естественной конвекции над известными данными можно объяснить меньшим недогревом раствора до температуры насыщения.

Выводы

1. Условия естественной конвекции позволяют достичь температуру, достаточную для нитрозакалки среднеуглеродистых сталей, при анодном нагреве деталей или образцов с площадью поверхности до 15 см^2 даже при небольших глубинах погружения.

2. Определена скорость испарения рабочих электролитов (15% водные растворы хлорида или нитрата аммония) при анодном нагреве в условиях естественной конвекции, достигающая 120 мл/ч в растворе хлорида аммония.

3. Плотность теплового потока из парогазовой оболочки в раствор при анодном нагреве в условиях естественной конвекции линейно зависит от напряжения нагрева и составляет $0,5\text{--}2,5 \text{ МВт/м}^2$, что несколько ниже величин, полученных при обтекании анода раствором со скоростями $0,3\text{--}1,4 \text{ м/с}$. Обнаруженное отличие объясняется меньшей степенью недогрева электролита до температуры насыщения в условиях естественной конвекции.

4. Получена возрастающая зависимость толщины парогазовой оболочки от напряжения нагрева. Численные значения толщины, составляющие $20\text{--}500 \text{ мкм}$, превосходят известные данные для условий продольного обтекания образца, что объясняется меньшей степенью недогрева раствора до температуры насыщения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования Российской Федерации (грант Т02-08.0-3151).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Мурас В.С.* О связи между температурой и напряжением тока при электролитном нагреве металлов // Машиностроитель Белоруссии. Минск, 1955.
2. *Белкин П.Н., Ганчар В.И., Товарков А.К.* Теплообмен между анодом и парогазовой оболочкой при электролитном нагреве // Инженерно-физический журнал. 1986. Т. 51. № 1. С. 154 – 155.
3. *Белкин П.Н., Товарков А.К.* Тепловые потоки при нагреве анода в водных растворах // Вестник Костромского государственного университета имени Н.А. Некрасова. 2001. № 3. С. 8–12.
4. *Белкин П.Н., Дьяков И.Г.* Профиль парогазового слоя при анодном нагреве вертикальной поверхности // Вестник Воронежского государственного технического университета. Серия «Энергетика». Вып. 7.2. Воронеж, 2002. С. 35–38.
5. *Дьяков И.Г., Товарков А.К., Белкин П.Н.* Толщина парогазовой оболочки при анодном нагреве вертикально погруженного цилиндра // Электронная обработка материалов. 2002. № 4. С. 43–49.
6. *Ганчар В.И., Згардан И.М., Дикусар А.И.* Анодное растворение железа в процессе электролитного нагрева // Электронная обработка материалов. 1994. № 4. С. 51–56.

Поступила 22.04.04

Summary

The rate of the electrolyte evaporation and heat flow densities, as a function of the voltage and heated samples dimensions are determined. The dependence of the vapor-gas shell thickness on the voltage is estimated.