

ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 628.3

В. В. Лихачева, канд. техн. наук, В. А. Кутовой, Д. С. Михиёнок

Автомобильно-дорожный институт

ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Горловка

ОПТИМИЗАЦИЯ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА СКОРОСТЬ НАКИПЕОБРАЗОВАНИЯ НА ПОВЕРХНОСТЯХ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ

Проблема образования накипи на поверхностях теплопередачи в оборотных системах различных областей промышленности влияет на снижение экологических и экономических показателей работы предприятий. При выборе методов защиты теплопередающих элементов важно учитывать и оптимизировать факторы, оказывающие влияние на скорость накипеобразования на поверхностях теплопередачи. Именно поэтому в статье рассматриваются зависимости скорости накипеобразования от температуры, а также индекса накипеобразования от температуры.

Ключевые слова: оборотные системы водоснабжения, накипеобразование, жесткость воды, щелочность воды, температура воды, поверхность теплопередачи, водоподготовка, индекс накипеобразования

Введение

Одним из наиболее радикальных путей снижения потребления воды питьевого качества является создание замкнутых систем промышленного водоснабжения, которые основаны на многократном использовании для производственных целей сточных вод, очищенных до норм, отвечающих требованиям к качеству технической воды.

Одной из основных проблем при использовании воды в оборотных системах является накипеобразование на поверхностях теплопередачи основного оборудования в энергетической, металлургической, химической и других отраслях промышленности. Это обуславливает снижение надежности и экономичности работы оборудования [1, 2].

В большинстве отраслей промышленности в качестве энергоносителя используется вода. Качество воды существенно влияет на экологические и экономические показатели работы предприятий. Накипеобразование на поверхностях теплопередачи приводит к значительному увеличению расхода энергоносителей.

Для очистки воды для подпитки теплофикационных котлов используется умягчение воды в натрий-катионитных фильтрах и обработка воды в водород-катионитных фильтрах, работающих в режиме так называемой «голодной» регенерации.

При регенерации этих фильтров в поверхностные водоемы сбрасывается большое количество засоленных стоков. Масса солей при этом в 3 раза превышает количество катионов жесткости, которые удаляются из воды.

При обработке воды в фильтрах, работающих в режиме «голодной» регенерации имеют место следующие недостатки: качество воды в процессе фильтроцикла существенно меняется, емкость поглощения фильтрующего материала сравнительно низкая, использование технологии возможно только для ограниченного состава поступающей воды [3].

Для повышения надежности работы теплоэнергетического оборудования улучшение ряда показателей качества воды способствует уменьшению накипеобразования, в то же время это усложняет систему водоподготовки и вызывает увеличение сбросов засоленных стоков в поверхностные водоемы [4, 5].

При выборе технологии очистки нужно учитывать влияние отдельных технологических показателей качества воды и скорости теплового потока на интенсивность накипеобра-

зования.

Принимая во внимание указанные обстоятельства, проведены исследования, касающиеся условий образования накипи.

Целью исследования является изучение и оптимизация факторов, влияющих на скорость накипеобразования на поверхностях теплопередачи.

Изложение основного материала исследований

Исследованием факторов, влияющих на скорость накипеобразования, активно занимался профессор Автомобильно-дорожного института ГОУВПО «ДОННТУ» С. П. Высоцкий и его ученики [6, 7, 8].

На основании его работ проводится дальнейшее изучение и оптимизация данных зависимостей.

Зависимость скорости накипеобразования от температуры

В результате экспериментальных исследований получены следующие значения зависимости скорости накипеобразования от температуры и произведения жесткости на щелочность циркуляционной воды (таблица 1).

Таблица 1 – Экспериментальные значения скорости накипеобразования

Скорость накипеобразования V , г·см ² /ч	Температура t , °С	Произведение жесткости на щелочность, г·экв/л
0,0085	83	1,54
0,013	97	
0,018	107	
0,019	119	
0,028	130	
0,08	58	6,96
0,092	72	
0,15	115	
0,42	130	
0,43	68	9,9
1,25	93	
1,6	108	
2,3	122	

Исходя из этих данных, имеем экспоненциальную зависимость между скоростью накипеобразования, температурой и произведением жесткости на щелочность, которая удовлетворяет уравнению вида:

$$V = A \cdot e^{B \cdot t} \cdot e^{C(\mathcal{J}_0)}, \quad (1)$$

где V – скорость накипеобразования, г·см²/ч;

t – температура, °С;

\mathcal{J}_0 – произведение жесткости на щелочность, г·экв/л;

A, B, C – коэффициенты.

Коэффициенты A, B, C находим при помощи калькуляционного пакета Mathsoft MathCAD.

$$\begin{aligned}
 n &:= 13 \quad i := 1..n \\
 A &:= 10 \quad B := -0.1 \quad C := 0.1 \\
 \text{Given} \\
 \sum_i \left[\frac{|y_i - (A \cdot e^{B \cdot x_i} \cdot e^{C \cdot z_i})|}{y_i} \right]^2 &= 0 \\
 \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \end{pmatrix} &:= \text{Minerr}(A, B, C) \\
 &= \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 8.083 \cdot 10^{-4} \\ 0.021 \\ 0.501 \end{pmatrix}.
 \end{aligned}$$

В результате получаем следующую зависимость:

$$V = 8,083 \cdot 10^{-4} e^{0,021t} \cdot e^{0,501(\omega_0)}. \quad (2)$$

Построим несколько графиков (рисунки 1–3), на которых изобразим теоретическую и экспериментальную зависимость $V(t)$ при постоянных значениях ω_0 (1,54; 6,96; 9,9) (таблицы 2–4).

Таблица 2 – Значения скорости накипеобразования при постоянной $\omega_0 = 1,54$

Экспериментальная скорость накипеобразования, V , г·см ² /ч	Теоретическая скорость накипеобразования, V , г·см ² /ч
0,0085	0,00982
0,013	0,013
0,018	0,016
0,019	0,021
0,028	0,026

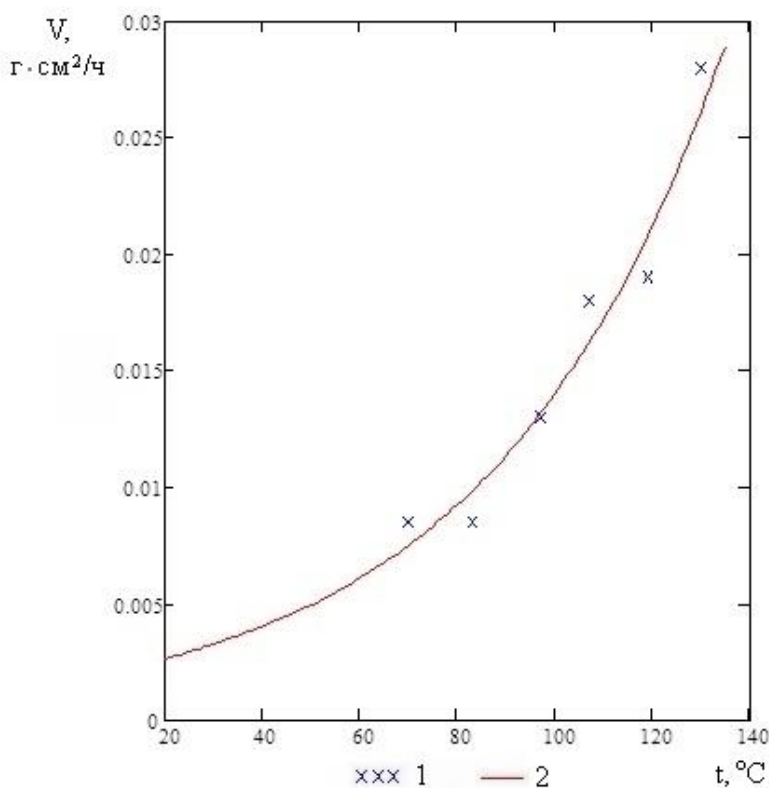
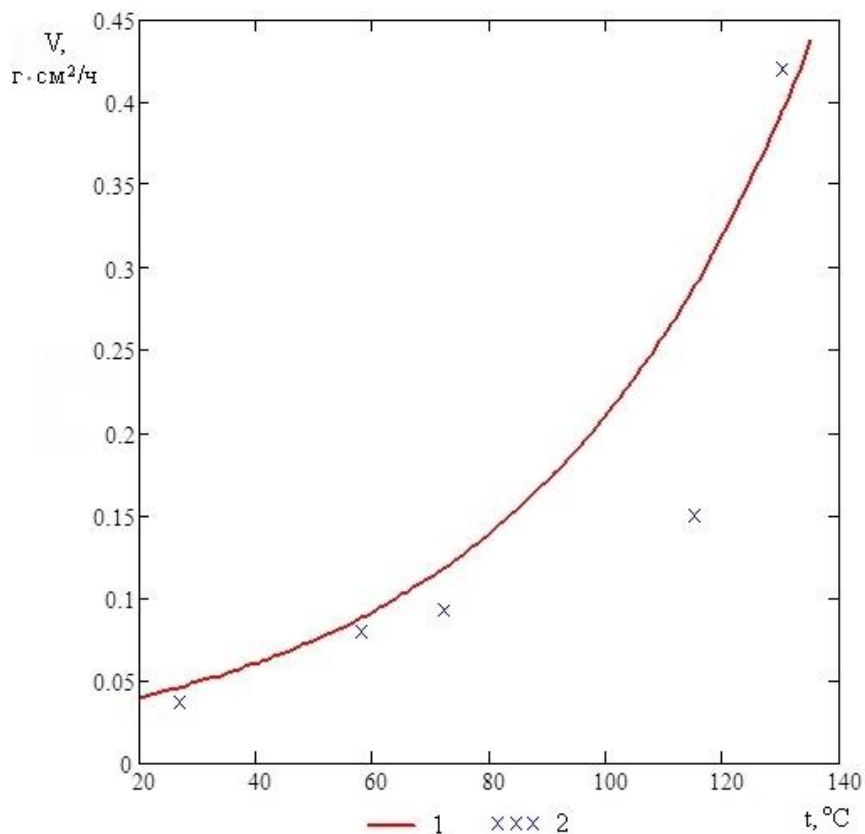


Рисунок 1 – Зависимость скорости накипеобразования от температуры при постоянной $\omega_0 = 1,54$ (1 – теоретическая, 2 – экспериментальная)

Таблица 3 – Значения скорости накипеобразования при постоянной $ж_0 = 6,96$

Экспериментальная скорость накипеобразования, V , г·см ² /ч	Теоретическая скорость накипеобразования, V , г·см ² /ч
0,08	0,088
0,092	0,118
0,15	0,289
0,42	0,394

Рисунок 2 – Зависимость скорости накипеобразования от температуры при постоянной $ж_0 = 6,96$ (1 – теоретическая, 2 – экспериментальная)Таблица 4 – Значения скорости накипеобразования при постоянной $ж_0 = 9,9$

Экспериментальная скорость накипеобразования, V , г·см ² /ч	Теоретическая скорость накипеобразования, V , г·см ² /ч
0,43	0,473
1,25	0,796
1,6	1,087
2,3	1,455

В результате расчетов получены три теоретические кривые, соответствующие кривым, полученным с помощью экспериментальных данных. Теоретическая кривая на рисунке 1 почти идеально совпадает с экспериментальными значениями зависимости скорости накипеобразования от температуры при постоянном значении произведения щелочности на жесткость. То же самое можно сказать и о теоретической кривой на рисунке 2. По теоретической кривой на рисунке 3, которая соответствует зависимости скорости накипеобразования от температуры при значении произведения щелочности на жесткость $ж_0 = 9,9$, имеется значи-

тельное отклонение полученных данных от экспериментальных. Это свидетельствует о том, что при $I_k > 7$ процесс накипеобразования подчиняется также и другим механизмам, кроме указанных в формуле. Следует отметить, что зависимость при данных значениях имеет чисто научное значение. На практике вода с таким карбонатным индексом не применяется.

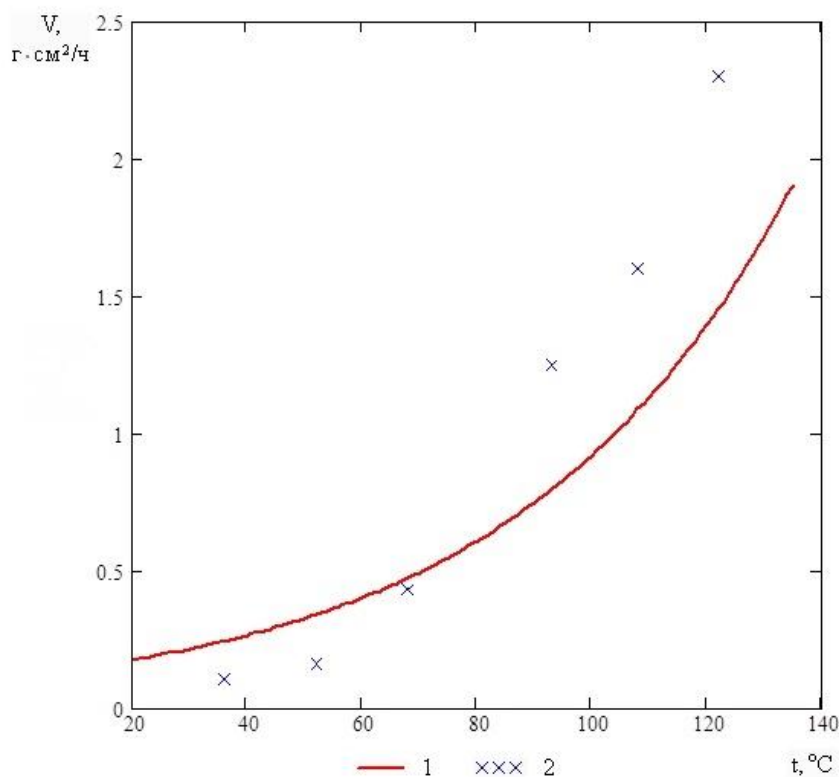


Рисунок 3 – Зависимость скорости накипеобразования от температуры при постоянной $\lambda_0 = 9,9$ (1 – теоретическая, 2 – экспериментальная)

Зависимость индекса накипеобразования от температуры

В ходе эксперимента были получены следующие данные зависимости индекса накипеобразования от температуры (таблица 5).

Таблица 5 – Зависимость индекса накипеобразования от температуры

$t, ^\circ\text{C}$	I_k
85,25	3,2
92,5	2,8
98,5	2,5
110	2,0
125	1,5
135	1,2

В соответствии с экспериментальными данными получаем зависимость индекса накипеобразования от температуры:

$$I_k = C \cdot t^{-1} + D. \quad (3)$$

Коэффициенты для данной зависимости вычислим с помощью калькуляционного пакета Mathcad:

$n := 7$	$i := 1..n$	$C := 0$	$D := 0$
$I_i :=$	$t_i :=$	Given	
3.2	85.25	$\sum_i [I_i - [C \cdot (t_i)^{-1} + D]]^2 = 0$ $\begin{pmatrix} C \\ D \end{pmatrix} := \text{Minerr}(C, D)$ $\begin{pmatrix} C \\ D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 477.414 \\ -2.363 \end{pmatrix}.$	
2.8	92.5		
2.5	98.5		
2.0	110		
1.5	125		
1.2	135		
0.8	147.5		

Тогда зависимость индекса накипеобразования от температуры примет вид:

$$I_k = 477,414 \cdot t^{-1} - 2,363. \quad (4)$$

Видим, что зависимость между индексом накипеобразования и температурой представляет собой показательную функцию (рисунок 4).

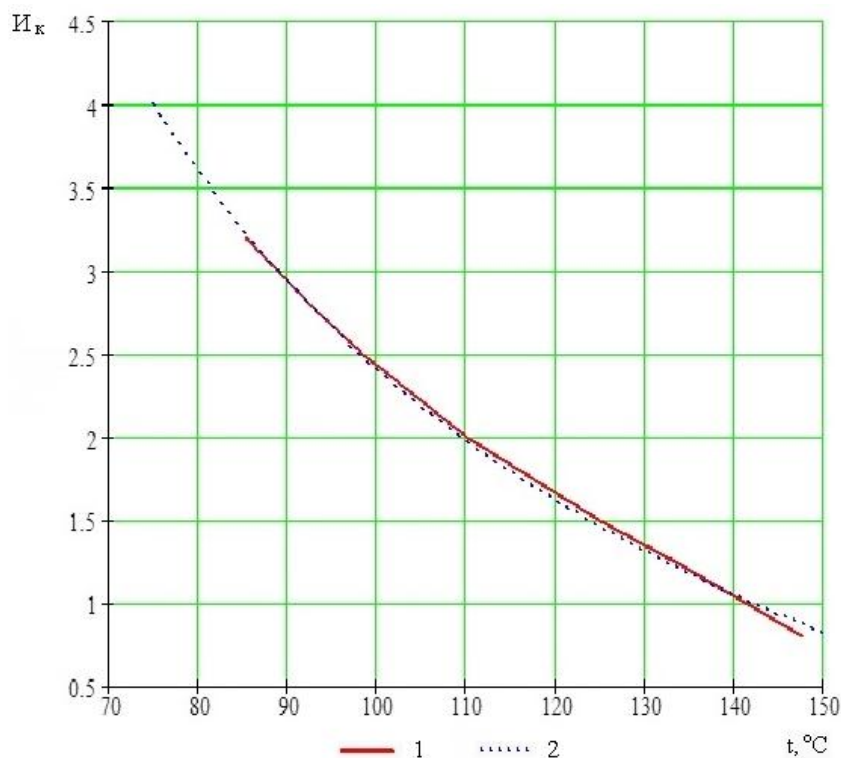


Рисунок 4 – Зависимость индекса накипеобразования от температуры (1 – теоретическая, 2 – экспериментальная)

Выводы

На основании проведенных исследований можно сделать следующие заключения:

1. Установлено, что при увеличении температуры уменьшается индекс накипеобразования, то есть чем выше температура, при которой работает аппарат, тем более обессоленная вода необходима.

2. Для снижения интенсивности накипеобразования необходимо использовать в оборотных системах воду с произведением щелочности на жесткость $ж_0 < 7$. Этим требованиям отвечает вода, которая прошла цикл очистки и умягчения методом ионного обмена. Наибо-

лее целесообразно было бы применение карбоксильного катионита, так как при этом идет процесс снижения показателей как жесткости воды, так и ее щелочности. Также этот метод позволяет уменьшить сбросы засоленных стоков в окружающую среду и сократить забор пресной воды для подпитки оборотной системы.

Список литературы

1. Gauchi R. Sustainable waste water management – treatment and reuse / R. Gauchi // Environmental Technology, 2006. – 350 p.
2. Давидсон, М. И. Накипеобразование внутри труб при постоянной тепловой нагрузке / М. И. Давидсон // Теплоэнергетика. – 2007. – № 5. – С. 64–67.
3. Высоцкий, С. П. Проблема выбора технологий обессоливания воды / С. П. Высоцкий, М. В. Коновальчик // Энергосбережение и водоподготовка. – 2016. – № 2(100). – С. 29–35.
4. Vysotsky, S. P. Improvement of water desalination Technologies in Reverse Osmosis Plants / S. P. Vysotsky, M. V. Konovalchik, S. E. Gulko // Thermal engineering. Pleiadesing, Inc. – 2017. – Vol. 64, № 7. – P. 542–548.
5. Высоцкий, С. П. Предотвращение накипеобразования и снижение сброса засоленных стоков в системах теплофикации / С. П. Высоцкий, А. В. Варивода // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2013. – № 5/6(65). – С. 4–7.
6. Высоцкий, С. П. Накипеобразование в оборотных системах / С. П. Высоцкий, А. В. Варивода // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2013. – № 6/6. – С. 57–61.
7. Vysotsky, S. P. Calcium carbonate formation in the water treatment systems and on the heating surfaces / S. P. Vysotsky, A. V. Fatkulina // Проблемы экологии. – 2013. – № 1. – С. 3–13.
8. Висоцький, С. П. Накипоутворення в теплофікаційних системах / С. П. Висоцький, Г. В. Фаткуліна // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. – 2009. – № 2. – С. 99–105.

В. В. Лихачева, В. А. Кутовой, Д. С. Михиёнок
Автомобильно-дорожный институт

ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Горловка

Оптимизация факторов, влияющих на скорость накипеобразования на поверхностях теплопередачи

В современной структуре промышленного производства Донбасса значительное место занимают предприятия энергетической, металлургической и химической отраслей. Для этих производств характерно наличие оборотных систем водоснабжения. Основной проблемой таких систем является накипеобразование на теплообменных поверхностях, которое приводит к снижению экологических и экономических показателей работы предприятий в целом. Для решения данной проблемы разработан ряд методик. Повысить их эффективность может учет и оптимизация факторов, влияющих на скорость накипеобразования. Среди этих факторов выделяют зависимость скорости и индекса накипеобразования от температуры.

В результате экспериментальных исследований установлено, что:

1. Рост температуры ведет к уменьшению индекса накипеобразования, то есть чем выше температура, при которой работает аппарат, тем более обессоленная вода необходима.
2. Для предотвращения накипеобразования необходимо использование воды с произведением щелочности на жесткость $ж_0 < 7$. Этому требованию может удовлетворять вода, подготовленная с применением ионного обмена. Наиболее целесообразно было бы применение карбоксильных катионитов, так как при этом идет процесс снижения показателей как жесткости воды, так и ее щелочности.

ОБОРОТНЫЕ СИСТЕМЫ ВОДОСНАБЖЕНИЯ, НАКИПЕОБРАЗОВАНИЕ, ЖЕСТКОСТЬ ВОДЫ, ЩЕЛОЧНОСТЬ ВОДЫ, ТЕМПЕРАТУРА ВОДЫ, ПОВЕРХНОСТЬ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ, ВОДОПОДГОТОВКА, ИНДЕКС НАКИПЕОБРАЗОВАНИЯ

V. V. Likhacheva, V. A. Kutovoi, D. S. Mikhienok

Automobile and Road Institute of Donetsk National Technical University, Gorlovka

Optimization of Factors Affecting the Rate of the Scale Formation on the Heat Transfer Surfaces

In the modern structure of the Donbass industrial production, a significant place is occupied by the enterprises of the energy, metallurgical and chemical industries. These industries are characterized by the circulating water supply systems. The main problem of such systems is the scale formation on the heat transfer surfaces, which leads to the decrease in the environmental and economic performance of enterprises as a whole. A number of techniques are developed to solve this problem. Their efficiency can be increased by taking into account and optimizing factors affecting the rate of the scale formation. Among these factors, the dependence of the scale formation rate and index on temperature is distinguished.

As a result of experimental studies, it is found that:

1. An increase in temperature leads to the decrease in the scale formation index, that is, the higher the temperature at which the device operates, the more demineralized water is needed.

2. To prevent scale formation, it is necessary to use water with an alkalinity to hardness < 7 . This requirement can be met by water treated using ion exchange. It would be the most expedient to use carboxyl cation exchangers, since this is accompanied by a process of decreasing indicators of both water hardness and its alkalinity.

CIRCULATING WATER SYSTEM, SCALE FORMATION, WATER HARDNESS, WATER ALKALINITY, WATER TEMPERATURE, HEAT TRANSFER SURFACE, WATER TREATMENT, SCALE FORMATION INDEX

Сведения об авторах:

В. В. Лихачева

SPIN-код РИНЦ: 1784-9410

Google Scholar: <https://scholar.google.com.ua/citations?user=OX4d7tgAAAAJ&hl>

Телефон: +38 (071) 379-75-92

Эл. почта: lixachova@mail.ru

В. А. Кутовой

SPIN-код РИНЦ: 7968-2661

Google Scholar: <https://scholar.google.com.ua/citations?user=RyBd2zoAAAAJ&hl=ru>

Телефон: +38 (071) 330-84-01

Эл. почта: kutovoj.vitalij@yandex.ua

Д. С. Михиёнок

Телефон: +38 (071) 361-08-84

Эл. почта: dmikhiynok@bk.ru

Статья поступила 09.12.2021

© В. В. Лихачева, В. А. Кутовой, Д. С. Михиёнок, 2021

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