

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ) (2.4.6)

УДК 628.193

DOI: 10.24160/1993-6982-2023-5-102-110

### Экспериментальное исследование влияния материала трубопровода на образование отложений

М.Ю. Юркина, Т.А. Матухнов

Рассмотрен вопрос влияния материала труб на процесс образования отложений в системе горячего водоснабжения котельной, их химический состав и физические характеристики. Исследование проводили на примере пяти материалов труб. Экспериментальный стенд состоял из семи последовательно соединенных участков труб. Выполнены измерения физических параметров образованных отложений и расчеты по влиянию на гидравлическое и термическое сопротивления и мощности на прокачку. По результатам химического анализа получен качественный состав отложений, во многом определяющийся материалом труб. В исследуемой системе горячего водоснабжения основу составляют коррозионные отложения, а также присутствует небольшая доля солей жесткости. Установлено влияние материала труб, как одного из основных факторов образования отложений, при этом материал трубопроводов практически не влияет на состав отложений соседних участков. Получены данные о сокращении отложений и уменьшении скорости увеличения термического и гидравлического сопротивлений при сравнении стальной и оцинкованной стальной труб.

*Ключевые слова:* отложения, материал трубопровода, система теплоснабжения, горячее водоснабжение, гидравлическое и термическое сопротивления.

*Для цитирования:* Юркина М.Ю., Матухнов Т.А. Экспериментальное исследование влияния материала трубопровода на образование отложений // Вестник МЭИ. 2023. № 5. С. 102—110. DOI: 10.24160/1993-6982-2023-5-102-110.

### Experimental Study of the Influence of Pipeline Material on the Formation of Deposits

M.Yu. Yurkina, T.A. Matukhnov

The article deals with the issue of the influence of pipe material on the process of deposit formation in the hot water supply system of a boiler house, their chemical composition and physical characteristics. The study was conducted on the example of five pipe materials. The experimental stand consisted of seven pipe sections connected in series. Measurements of the physical parameters of the formed deposits and further calculations of the effect on hydraulic resistance and pumping power, as well as the effect on thermal resistance, were carried out. According to the results of the performed chemical analysis, the qualitative composition of the deposits was obtained, which is largely determined by the material of the pipes. In the investigated hot water supply system, the basis is corrosive deposits, and there is also a small proportion of hardness salts. The influence of pipe material as one of the main factors in the formation of deposits has been established, while the material of pipelines has practically no effect on the composition of deposits in neighboring sections. The paper obtained data on the reduction of deposits and a decrease in the rate of increase in thermal and hydraulic resistance when comparing a steel pipe and a galvanized steel pipe.

*Key words:* deposits, pipeline material, heat supply system, hot water supply, hydraulic resistance, thermal resistance.

*For citation:* Yurkina M.Yu., Matukhnov T.A. Experimental Study of the Influence of Pipeline Material on the Formation of Deposits. Bulletin of MPEI. 2023;5:102—110. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2023-5-102-110.

## Введение

Образование отложений, вызванных коррозией материалов трубопроводов, а также выпадение солей жесткости из нагретого теплоносителя — одна из важнейших проблем, затрудняющих работу оборудования систем теплоснабжения [1]. Отложения приводят к загромождению сечений трубопроводов, росту затрат на перекачивание теплоносителя и нарушению балансировки систем теплоснабжения. В теплообменной аппаратуре отложения ведут к росту термического сопротивления и снижению передаваемого теплового потока [2].

Цель настоящей работы — экспериментальное исследование влияния материала трубопровода на химический состав и физические характеристики отложений в системе горячего водоснабжения, а также определение влияния образовавшихся отложений на гидравлические потери и термическое сопротивление стенок труб.

## Условия проведения эксперимента

Эксперимент проходил в котельной, расположенной в г. Москве. Исследуемый трубопровод закрытой системы горячего водоснабжения (ГВС) собственных нужд подключен взамен существующей трубы после пластинчатого теплообменника Ридан типа НН № 14 серии 014-32210 для подогрева горячей воды. Рабочее давление в подающем трубопроводе системы ГВС —  $3 \pm 0,5$  бар.

Экспериментальный стенд включал в себя семь участков труб (табл. 1), установленных вертикально

и последовательно с целью обеспечения одинакового расхода воды, перед которыми были расположены: счетчик воды СКБ 8232.00.00.00 ПС (порог чувствительности —  $0,12 \text{ м}^3/\text{ч}$ ); термометр Росма Б-5 (класс точности —  $1,5\%$ , цена деления —  $2^\circ\text{C}$ ); манометр Метер ДМ02-100-1G (класс точности —  $1,5\%$ , цена деления —  $0,5$  бар).

Одинаковые участки труб № 1, 6 марки Ст 20ПС с покрытием Zn поставлены с целью исследования изменения состава отложений по длине трубопровода и влияния материала образцов на химический состав отложений, образующихся на соседних участках, аналогично расположены участки труб № 2, 5 марки Ст 20.

Толщина цинкового покрытия на образцах № 1, 6 —  $70 \text{ мкм}$  [3].

Экспериментальная установка была элементом действующей системы ГВС, поэтому значения расходов и температур менялись с течением времени, испытывая колебания в зависимости от разбора воды потребителями (табл. 2). Общее время работы — 9120 часов.

## Результаты экспериментальных исследований

При проведении эксперимента выполнен химический анализ воды в соответствии с [5], результаты представлены в табл. 3, 4.

По окончании эксперимента образцы были демонтированы, проведен анализ образовавшихся отложений. С помощью штангенциркуля измерена толщина отложений, погрешность измерения составила  $0,05 \text{ мм}$ ,

Таблица 1

## Параметры исследуемых участков труб

Участок	Марка	Материал	ГОСТ по химическому составу	Диаметр, мм		Толщина стенки, мм	Длина, мм	Теплопроводность, Вт/(м·°C)
				наружный	внутренний			
1	Ст 20ПС с покрытием Zn	Оцинкованная сталь 20	1050—88	42,7	36,1	3,30	300	51,350
2	Ст 20	Сталь 20	1050—88	42,5	36,7	2,90		16,000
3	08X18H10T	Нержавеющая сталь	5632—72	38,2	34,0	2,10		
4	Д16	Алюминий	4784—97	35,0	30,6	2,20		123,46
5	Ст 20	Сталь 20	1050—88	42,5	36,7	2,90		51,350
6	Ст 20ПС с покрытием Zn	Оцинкованная сталь 20		42,7	36,1	3,30		
7	PPR	Полипропилен	26996—86	41,0	29,9	5,55		0,240

Таблица 2

## Режимные параметры работы системы

Показатели	Диапазон изменений	Средневзвешенное значение	Погрешность измерения
Температура, °C	60...75	62,0	3,00
Расход воды, м³/ч	0,27...0,42	0,30	5%

Таблица 3

**Химические параметры воды**

Показатели	Диапазон изменений	Среднее значение	Погрешность измерения	Нормы по СанПиН
pH	7,44...7,62	7,510	0,20	6,00...9,00
Общая щелочность, ммоль/дм <sup>3</sup>	3,22...4,17	3,850	0,46	—
Жесткость, Ж	3,79...5,78	4,730	0,71	≤ 7,00
Цветность, град.	3,30...9,40	6,047	1,81	≤ 20,00

Таблица 4

**Химический состав воды**

Показатели, мг/дм <sup>3</sup>	Диапазон изменений	Среднее значение	Погрешность измерения	Нормы по СанПиН
Гидрокарбонаты	196,00...254,00	234,33	—	—
Хлориды	19,60...34,70	26,830	3,00	≤ 350,00
Сульфат-ионы	22,10...24,80	23,170	4,63	≤ 500,00
Кальций	54,90...73,10	66,230	7,23	—
Кремний	3,48...5,53	4,7500	1,00	≤ 10,00
Железо	0,050...0,067	0,0570	0,01	≤ 0,300
Медь	< 0,005	< 0,005	—	≤ 1,00
Цинк	0,011...0,013	0,0120	0,0025	≤ 5,00
Хром (VI)	< 0,010	< 0,010	—	≤ 0,05
Свинец	< 0,002	< 0,002	—	≤ 0,03
Натрий	11,10...15,00	13,370	2,300	≤ 200,00
Нефтепродукты	0,023...0,034	0,0300	0,010	≤ 0,10
Сухой остаток	242,00...333,00	300,33	27,00	≤ 1000,00

при использовании профилемера PCWI с погрешностью 0,007 мм установлены параметры выступов отложений для получения показателя шероховатости. С помощью лабораторных весов AND GF-600 с ГП и штангенциркуля выполнена количественная оценка по определению массы отложений на единицу поверхности, погрешность косвенного измерения массы — 0,01 г/м<sup>2</sup>. На основании полученных измерений рассчитаны плотность и массовая скорость (табл. 5).

При изучении отложений можно сделать вывод о разнообразии отложений по химическому составу и структуре (рис. 1, 2):

Отложения на оцинкованной трубе представляют собой твердые, хрупкие, объемные локальные наросты, неравномерно распределенные по длине трубопровода, при этом на поверхности присутствуют локальные коррозионные язвы, отложения имеют свойство намагничиваться.

Отложения на стенках труб из углеродистой стали Ст 20 распределены по всей поверхности трубопровода неравномерным по толщине бугристым слоем темно-коричневого цвета и имеют твердую неоднородную структуру. На поверхности трубы марки 08X18H10T присутствует тонкий равномерно распределенный налет отложений бледно-коричневого цвета, состоящий из мелкодисперсных частиц.

На поверхности трубы марки Д16 образовались крупнокристаллические отложения серого цвета со светло-желтыми примесями, распределенные сплошным слоем по поверхности, содержащие преимущественно соединения алюминия. Отложения имеют хлопьеобразную форму, неоднородную рыхлую структуру и легко растираются. У них отсутствует свойство намагничивания.

На поверхности трубы из полипропилена обнаружен равномерный налет оранжево-коричневого цвета. Отложения — мелкодисперсные, по структуре похожие на пыль.

По результатам визуального анализа отложений исследуемых образцов можно сделать вывод о том, что на участках марки 08X18H10T и марки PPR найдено значительно меньшее количество отложений. Образующиеся на поверхности Ст 20 отложения имеют схожую структуру и характер образования по сравнению с отложениями на поверхности Ст 20ПС с покрытием Zn.

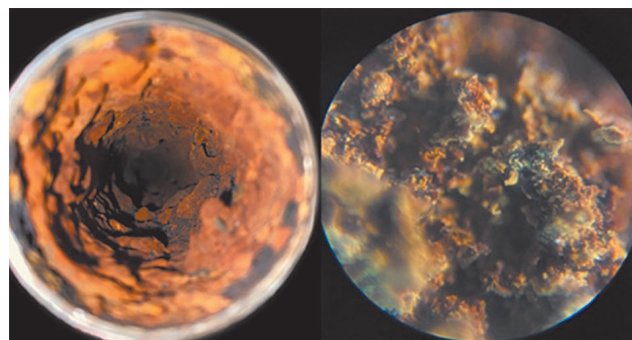
Образовавшегося налета на образцах № 3 марки 08X18H10T и № 7 марки PPR недостаточно для проведения анализа. При анализе поверхностей с аналогичными образованиями отложений эксплуатирующими организациями принято, что отложения отсутствуют.

Таблица 5

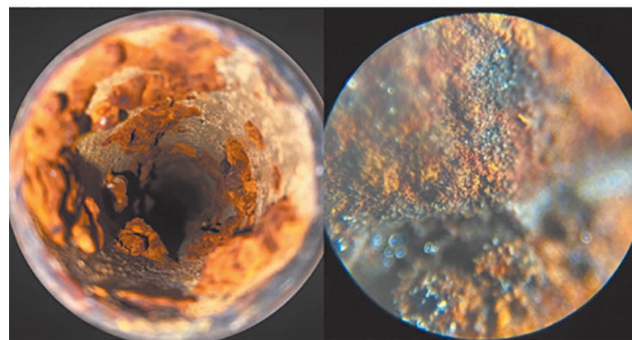
## Параметры исследуемых участков труб

Участок	Средняя толщина отложений, мм	Масса отложений на единицу поверхности, г/м <sup>2</sup>	Плотность отложений, кг/м	Средняя массовая скорость образования отложений, г/(м <sup>2</sup> ·ч)	Шероховатость, мм
1	2,73	200	73,39	0,0219	1,27/0,16*
2	2,60	300	115,31	0,0329	1,45
3	0,10	Образованных отложений недостаточно для проведения анализа			0,11
4	2,22	176	79,40	0,0193	1,53
5	2,78	284	102,34	0,0311	1,59
6	2,93	171	58,30	0,0188	1,39/0,16*
7	0,05	Образованных отложений недостаточно для проведения анализа			0,06

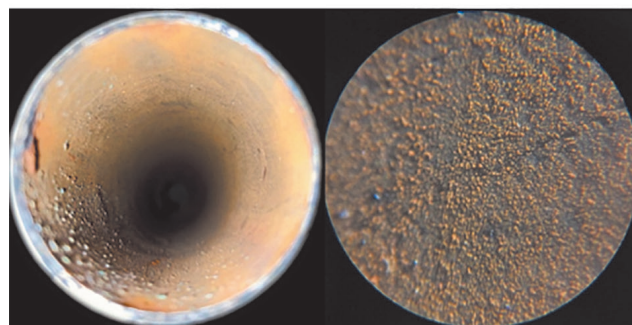
\* Для образцов марки Ст 20ПС с покрытием Zn первый показатель обозначает шероховатость в зоне образования отложений, а второй — в зоне образования незначительной толщины отложений



а



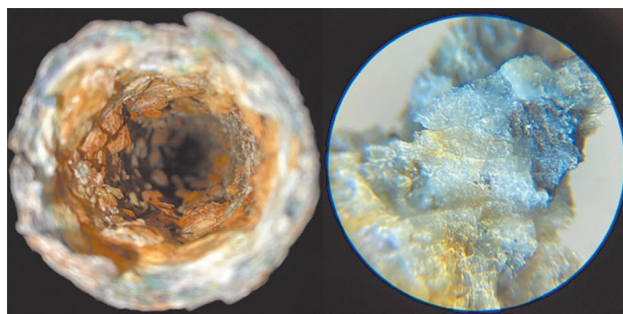
б



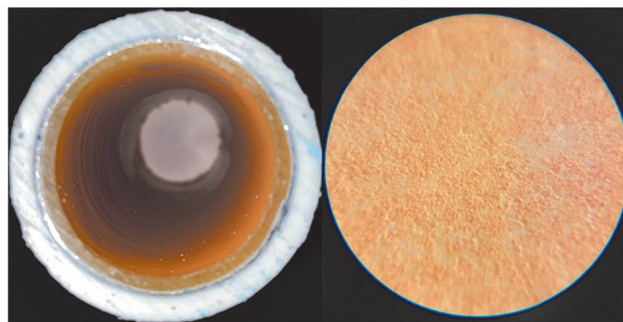
в

Рис. 1. Фотографии отложений в стальных трубопроводах (без увеличения и при увеличении 320°):

а — Ст 20; б — Ст 20ПС с покрытием Zn; в — 08X18H10T



а



б

Рис. 2. Фотографии отложений в трубопроводе (без увеличения и при увеличении 320°):

а — Д16; б — PPR

С целью определения химического состава образованные отложения были счищены с поверхности и отправлены на лабораторные исследования. Качественный состав образованных отложений, полученный путем химического анализа в соответствии с [6], дан в табл. 6.

В соответствии с полученными данными можно сделать вывод, что образование указанных отложений связано, в основном, с процессом коррозии материала поверхности, так как на образцах № 1, 2, 5, 6 из стали основу отложений составляет гидроксид железа (70...90%) и присутствуют соли жесткости (1,34...4,44 %),



Таблица 6

## Химический состав отложений

Показатели, %	Участок						
	1	2	3	4	5	6	7
Потери при прокаливании	13,0	7,99	Образованных отложений недостаточно для проведения химического анализа	37,6	6,61	12,5	Образованных отложений недостаточно для проведения химического анализа
Содержание кремнекислоты	1,22	1,07		7,56	0,55	1,17	
Массовая доля железа	69,4	83,9		0,59	90,3	73,6	
Массовая доля цинка	11,5	0,172		0,59	0,48	11,2	
Массовая доля меди	0,162	0,111		1,42	0,025	0,037	
Массовая доля кальция и магния	4,20	4,44		1,39	1,34	1,44	
Массовая доля алюминия	—	—		43,5	—	—	

а на образце № 4 из алюминия — гидроксид алюминия (43,5%) и соли жесткости (1,39%). Процесс образования коррозионных отложений в водной среде с ионами  $H^+$ ,  $OH^-$  связан с электрохимическими реакциями [7].

Сравнение химического состава отложений показало, что при последовательном соединении материалов исследуемых образцов практически не влияет на состав отложений соседних участков. Также при сопоставлении показателей химического состава отложений участков № 1, 6 марки Ст 20ПС с покрытием Zn наблюдались снижение доли солей в отложениях и увеличение содержания железа по длине, аналогичный вывод можно сделать при анализе участков № 2, 5 марки Ст 20.

## Влияние отложений на гидравлический режим системы

Оценено влияние отложений на гидравлический режим системы. В качестве характерного размера в расчете принят гидравлический диаметр  $d_r$ . При анализе под шероховатостью  $\Delta$  понимается средняя высота выступов в соответствии с [8].

Поскольку режим течения — турбулентный, то все расчетные формулы приняты для данного режима.

Условие гидравлически гладких труб, при котором толщина ламинарного подслоя больше выступов шероховатости, следующее:

$$\bar{\Delta} \leq \bar{\Delta}_{\text{пред}}, \quad (1)$$

где  $\bar{\Delta}$  — относительная шероховатость поверхности;  $\bar{\Delta}_{\text{пред}}$  — предельное число относительной шероховатости, при которой начинается ее влияние на коэффициент сопротивления трения поверхности.

Большинство технических труб характеризуется неравномерной шероховатостью [8], поэтому условимся при расчетах, что исследуемые образцы имеют неравномерную шероховатость.

При неравномерной шероховатости предельное число относительной шероховатости рассчитывается по формуле [8]:

$$\bar{\Delta}_{\text{пред}} = \frac{\Delta}{d_r} \approx \frac{15}{Re}. \quad (2)$$

Предельное число Рейнольдса, при котором трубы перестают быть гидравлически гладкими [8], равно:

$$Re'_{\text{пред}} \approx 15/\bar{\Delta}. \quad (3)$$

При этом предельное значение числа Рейнольдса, при котором начинает действовать квадратичный закон сопротивления, выглядит следующим образом [8]:

$$Re''_{\text{пред}} \approx 560/\bar{\Delta}. \quad (4)$$

Для области турбулентного стабилизированного течения ( $Re > 4000$ ) коэффициент сопротивления трения труб с гидравлически гладкими стенками вычислен по формуле Филоненко–Альтшуля [9, 10].

Коэффициент сопротивления трения труб при стабилизированном течении и на участке чисто турбулентного режима ( $Re'_{\text{пред}} < Re < Re''_{\text{пред}}$ ) найден по формуле, предложенной А.Д. Альтшулем [9].

На участке  $Re > Re''_{\text{пред}}$  коэффициент сопротивления трения труб установлен по формуле Никурадзе [11].

Для труб с различными участками шероховатости, локальными наростами отложений расчет коэффициента сопротивления трения сделан по формуле А.М. Керенского [12]:

$$\xi = \xi_1 x_1 + \xi_2 x_2, \quad (5)$$

где  $\xi_1, \xi_2$  — коэффициенты сопротивления трения поверхности без наростов и с локальными наростами отложений;  $x_1, x_2$  — доли занимаемой поверхности без наростов с шероховатостью  $\xi_1$  и поверхности с наростами отложений с шероховатостью  $\xi_2$ . Сумма  $x_1, x_2$  равна 1.

Потери давления по длине прямой трубы постоянного поперечного сечения рассчитаны по формуле Дарси–Вейсбаха [8].

На начальный момент времени в соответствии с параметрами работы системы все трубы гидравлически гладкие.

В соответствии с данными А.Р. Исяновой [13] и М.В. Лукина [14], интенсивность образования отложений можно разделить на три периода:

• I период — скорость роста отложений наиболее высока, определяется линейной зависимостью  $at$ ;

• II период — переходный, скорость образования отложений описывается как  $b + ct^k$ ;

• III период — минимальная скорость образования отложений, имеет зависимость  $d + ft$ .

В указанных периодах  $a, b, c, d, f, k$  — коэффициенты, являющиеся функциями качества теплоносителя;  $t$  — время работы системы.

График зависимости толщины отложений в местах их образования от времени работы системы представлен на рис. 3. При построении зависимости для образца Ст 20ПС с покрытием Zn учтена только площадь с образованием характерных отложений.

Экспериментальный стенд не предусматривал возможность измерения толщины отложений во времени, и для её оценки авторы использовали результаты измерений толщины слоя в конце периода измерений и выводы, полученные в [14, 13]:

В [14] выдвинута гипотеза для закрытых систем теплоснабжения о том, что в первом периоде скорость образования отложений в 8...10 раз выше остальных периодов, и далее остается примерно постоянной;

В [13] приведено предположение о периоде работы до 2000 ч, при котором скорость роста отложений высока и линейна.

Исходя из указанных допущений для определения промежуточной точки для графика толщины отложений, зададим условие, что скорость образования отложений в первом периоде в 9 раз больше остальных и является примерно постоянной, а в качестве границы первого периода возьмем 2000 ч.

Приняты допущения о постоянстве температуры, расхода, водородного показателя pH, химического состава воды и пропорциональной скорости роста отложений по различным материалам труб.

Как следует из данных рис. 3, при использовании трубы PPR интенсивность образования отложений ниже в 37...47 раз, при этом на трубе 08X18H10T она в 2 раза больше, чем у трубы PPR.

На основании (1) — (5) и полученной зависимости изменения толщины отложений от времени изучено

влияние отложений на гидравлические характеристики работы системы горячего водоснабжения.

Поскольку текущая требуемая мощность на прокачку теплоносителя  $N$  имеет линейную зависимость от гидравлического сопротивления  $\Delta P$ , отношение текущей требуемой мощности на прокачку  $N$  к требуемой мощности на прокачку в начальный момент  $N_0$  будет соответствовать отношению текущего гидравлического сопротивления  $\Delta P$  к гидравлическому сопротивлению в начальный момент  $\Delta P_0$ . Зависимость данных отношений от времени изображена на рис. 4. При расчете показателей и построении зависимости для образца Ст 20ПС с покрытием Zn учтено образование отложений на 40%-х площади поверхности по результатам проведенных визуальных исследований, а рост площади образования отложений — линейный.

Относительный рост гидравлического сопротивления и затрат на прокачку за период проведения эксперимента для трубы Д16 составил 3,50; для Ст 20 — 3,1; для Ст 20ПС с покрытием Zn — 1,53; для 08X18H10T и PPR сопротивление и затраты практически не выросли.

Относительное увеличение гидравлического сопротивления и затрат на прокачку к начальным параметрам для труб 08X18H10T и PPR меньше в 3,25...3,33 раза по отношению к трубе Д16 и в 2,91...2,98 раза ниже по отношению к трубе Ст 20. При этом у Ст 20 относительное увеличение гидравлического сопротивления и затрат на прокачку в 2 раза выше, чем у Ст 20ПС с покрытием Zn. Следует отметить, что в соответствии с выполненными расчетами трубопровод PPR на протяжении всего периода проведения эксперимента является гидравлически гладким. Таким образом, наилучшим решением для применения в системах ГВС из рассматриваемых материалов являются трубы марок PPR и 08X18H10T.

### Влияние отложений на тепловой режим работы системы

Используя предположение К.А. Клейвайчука [15] о том, что коэффициент теплопроводности коррозион-

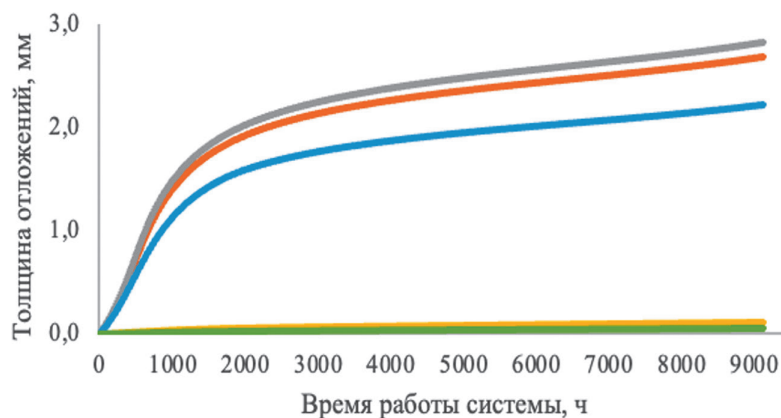


Рис. 3. Графики зависимости толщины образованных отложений от времени работы системы:

— Ст 20; — Ст 20ПС с покрытием Zn; — 08X18H10T; — Д16; — PPR

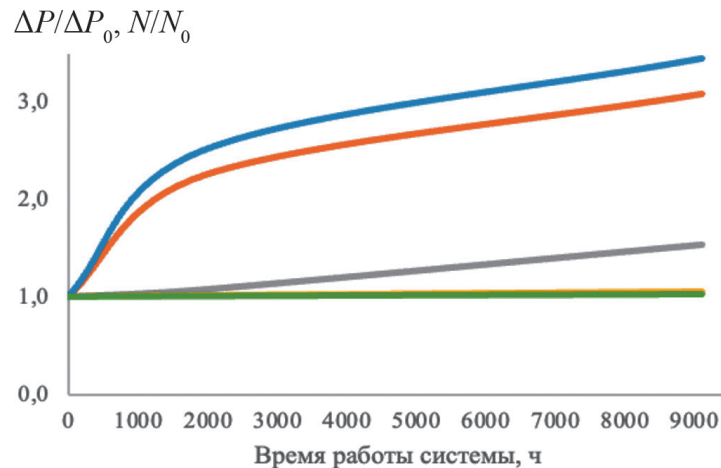


Рис. 4. Графики зависимости отношений гидравлического сопротивления и текущей требуемой мощности на прокачку к показателям в начальный момент от времени работы системы:

— Ст 20; — Ст 20ПС с покрытием Zn; — 08X18H10T; — Д16; — PPR

но-накипных отложений  $\lambda_{\text{отл}}$  зависит от плотности (пористости) отложений, а влиянием химического состава можно пренебречь, рассчитан коэффициент теплопроводности отложений:

$$\lg(\lambda_{\text{отл}} + 0,26) = 0,35\rho_{\text{отл}} - 0,51,$$

где  $\lambda_{\text{отл}}$  — коэффициент теплопроводности коррозионно-накипных отложений, ккал/(м·ч·°C);  $\rho_{\text{отл}}$  — плотность отложений, г/см<sup>3</sup>.

На основании данных коэффициентов теплопроводностей стенки трубы и отложений термическое сопротивление оценено путем суммы отношений толщины к коэффициенту теплопроводности. С учетом допущения, что плотность отложений постоянна, построим график зависимости отношения термического сопротивления к начальному термическому сопротивлению в зависимости от времени работы системы (рис. 5).

Относительное увеличение термического сопротивления за период проведения эксперимента для труб составило: Д16 — 1540; Ст 20 — 530; Ст 20ПС с покрытием Zn — 231; для труб 08X18H10T и PPR оно практически не изменилось.

Относительный рост термического сопротивления к начальному значению для труб Ст 20 выше в 2 раза, чем у Ст 20 ПС с покрытием Zn.

### Закключение

В результате проведенного экспериментального исследования установлено влияние материала труб, как одного из основных факторов образования отложений. Состав отложений во многом определяется материалом труб. Так, большую долю в составе отложений на алюминиевом трубопроводе марки Д16 составил гидроксид алюминия (43,5 %), а на стальных

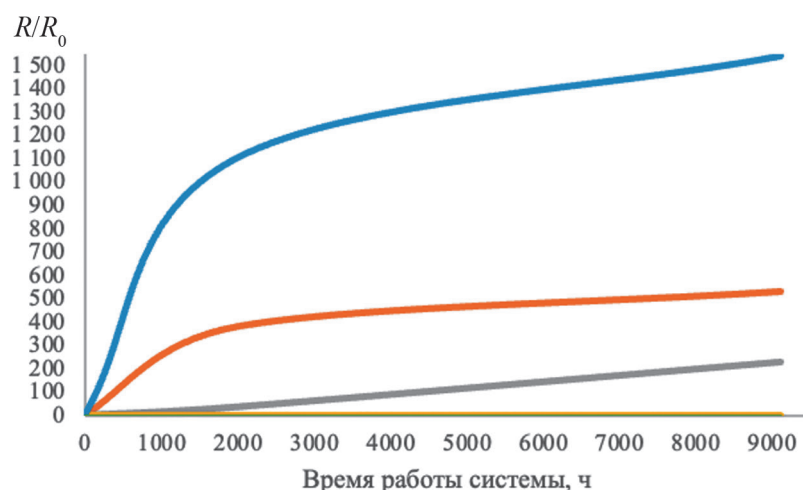


Рис. 5. Графики зависимости отношения термического сопротивления к термическому сопротивлению в начальный момент от времени работы системы:

— Ст 20; — Ст 20ПС с покрытием Zn; — 08X18H10T; — Д16; — PPR

трубопроводах основной долей стал гидроксид железа (70...90%). При проведении эксперимента материалы трубопроводов практически не влияют на состав отложений соседних участков. В исследуемой системе горячего водоснабжения 43,5...90,0% составляют коррозионные отложения, а отложения солей жесткости — 1,39...4,44%.

На трубах из стали в составе образованных отложений растёт содержание железа, а содержание солей уменьшается по длине.

Относительное увеличение гидравлического сопротивления для трубы Д16 — 3,5; Ст 20 — 3,1; Ст 20ПС с покрытием Zn — 1,53, для труб 08Х18Н10Т и PPR — практически не выросло. Трубопровод PPR на

протяжении всего периода проведения эксперимента был гидравлически гладким.

Относительное повышение термического сопротивления за период проведения эксперимента: для труб Д16 — 1540; Ст 20 — 530; Ст 20ПС с покрытием Zn — 231; 08Х18Н10Т и PPR — практически не поменялось.

Из рассмотренных материалов наилучшими оказались марки PPR и 08Х18Н10Т. Следует отметить, что слой цинка на стали способствует снижению отложений и уменьшению скорости увеличения термического и гидравлического сопротивлений в 2 раза.

Полученные экспериментальные данные могут быть использованы при разработке и проверке модели процесса образования отложений.

### Литература

1. Li W. e. a. Investigation of  $\text{CaCO}_3$  Fouling in Plate Heat Exchangers // Heat and Mass Transfer. 2016. V. 52. Pp. 2401—2414.
2. Горяев А.Б. и др. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях. М.: Издат. дом МЭИ, 2021.
3. ГОСТ 9.307—2021. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия цинковые горячие. Общие требования и методы контроля.
4. Кузнецов В.А. Гидрогазодинамика. М.: Юрайт, 2023.
5. ГОСТ Р 51232—98. Вода питьевая. Общие требования к организации и методам контроля качества.
6. РД 153-34.1-37.306—2001. Методические указания по контролю состояния основного оборудования тепловых электрических станций определение количества и химического состава отложений.
7. Ярославцева О.В. Коррозия и защита металлов. М.: Юрайт, 2022.
8. Юрьев А.С. Справочник по расчетам гидравлических и вентиляционных систем. СПб.: АНО НПО «Мир и семья», 2001.
9. Альтшуль А.Д. Гидравлические сопротивления. М.: Недра, 1982.
10. Филоненко Г.К. Формула для коэффициента гидравлического сопротивления гладких труб // Известия ВТИ. 1948. № 10(162). С. 17—23.
11. Никурадзе И. Закономерности турбулентного движения в гладких трубах // Проблемы турбулентности. 1936. С. 75—150.
12. Керенский А.М. О связи коэффициента сопротивления трения с числом Рейнольдса и относительной шероховатостью // Теплоэнергетика. 1972. № 10. С. 78—79.
13. Исянова А.Р. Создание математической модели образования отложений продуктов коррозии на теплопередающих поверхностях: дис. ... канд. техн. наук. М.: НИУ «МЭИ», 2009.
14. Лукин М.В. Повышение эффективности эксплуатации систем теплоснабжения на основе модифи-

### References

1. Li W. e. a. Investigation of  $\text{CaCO}_3$  Fouling in Plate Heat Exchangers. Heat and Mass Transfer. 2016;52: 2401—2414.
2. Goryaev A.B. i dr. Energosberezhenie v Teploenergetike i Teploekhnologiyakh. M.: Izdat. Dom MEI, 2021. (in Russian).
3. GOST 9.307—2021. Edinaya Sistema Zashchity ot Korrozii i Stareniya. Pokrytiya Tsinkovye Goryachie. Obshchie Trebovaniya i Metody Kontrolya. (in Russian).
4. Kuznetsov V.A. Gidrogazodinamika. M.: Yurayt, 2023. (in Russian).
5. GOST R 51232—98. Voda Pit'evaya. Obshchie Trebovaniya k Organizatsii i Metodam Kontrolya Kachestva. (in Russian).
6. RD 153-34.1-37.306—2001. Metodicheskie Ukazaniya po Kontrolyu Sostoyaniya Osnovnogo Oborudovaniya Teplovykh Elektricheskikh Stantsiy Opredelenie Kolichestva i Khimicheskogo Sostava Otlozheniy. (in Russian).
7. Yaroslavtseva O.V. Korroziya i Zashchita Metallov. M.: Yurayt, 2022. (in Russian).
8. Yur'ev A.S. Spravochnik po Raschetam Gidravlicheskh i Ventilyatsionnykh Sistem. SPb.: ANO NPO «Mir i Sem'ya», 2001. (in Russian).
9. Al'tshul' A.D. Gidravlicheskie Soprotivleniya. M.: Nedra, 1982. (in Russian).
10. Filonenko G.K. Formula dlya Koeffitsienta Gidravlicheskogo Soprotivleniya Gladkikh Trub. Izvestiya VTI. 1948;10(162):17—23. (in Russian).
11. Nikuradze I. Zakonomernosti Turbulentnogo Dvizheniya v Gladkikh Trubakh. Problemy Turbulentnosti. 1936:75—150. (in Russian).
12. Kerenskiy A.M. O Svyazi Koeffitsienta Soprotivleniya Treniya s Chislom Reynol'dsa i Otnositel'noy Sherokhovatost'yu. Teploenergetika. 1972;10:78—79.
13. Isyanova A.R. Sozdanie Matematicheskoy Modeli Obrazovaniya Otlozheniy Produktov Korrozii na Teploperedayushchikh Poverkhnostyakh: Dis. ... Kand. Tekhn. Nauk. M.: NIU «MEI», 2009. (in Russian).
14. Lukin M.V. Povyshenie Effektivnosti Ekspluatatsii Sistem Teplosnabzheniya na Osnove Modifikatsii Tep-



кации теплообменных поверхностей с использованием поверхностно-активных веществ: дис. ... канд. техн. наук. М.: НИУ «МЭИ», 2008.

15. Рубашов А.М., Сазонов Р.П. Зарастание теплообменных трубок-подогревателей систем горячего водоснабжения // Водоснабжение и санитарная техника. 1990. № 8.

loobmennykh Poverkhnostey s Ispol'zovaniem Poverkhnostno-aktivnykh Veshchestv: Dis. ... Kand. Tekhn. Nauk. M.: NIU «MEI», 2008. (in Russian).

15. Rubashov A.M., Sazonov R.P. Zarastanie Teploobmennykh Trubok-podogrevateley Sistem Goryachego Vodosnabzheniya. Vodosnabzhenie i Sanitarnaya Tekhnika. 1990;8. (in Russian).

#### Сведения об авторах:

**Юркина Мария Юрьевна** — кандидат технических наук, доцент кафедры тепломассообменных процессов и установок, заместитель директора Института энергоэффективности и водородных технологий НИУ «МЭИ», e-mail: YurkinaMY@mpei.ru

**Матухнов Тимур Алексеевич** — аспирант кафедры тепломассообменных процессов и установок НИУ «МЭИ», e-mail: MatukhnovNA@mpei.ru

#### Information about authors:

**Yurkina Mariya Yu.** — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Heat and Mass Transfer Processes and Installations Dept., Deputy Director of Institute of Energy Efficiency and Hydrogen Technologies, NRU MPEI, e-mail: YurkinaMY@mpei.ru

**Matukhnov Timur A.** — Ph.D.-student of Heat and Mass Transfer Processes and Installations Dept., NRU MPEI, e-mail: MatukhnovNA@mpei.ru

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

**Conflict of interests:** the authors declare no conflict of interest

**Статья поступила в редакцию:** 01.07.2023

**The article received to the editor:** 01.07.2023

**Статья принята к публикации:** 05.09.2023

**The article has been accepted for publication:** 05.09.2023