

Научная статья

УДК 621.565.93/95

DOI 10.48012/1817-5457_2026_2_179-186

УРОВНИ ВАРЬИРОВАНИЯ ФАКТОРОВ ПРИ ИСПЫТАНИИ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННУЮ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ МОДЕРНИЗИРОВАННЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

Саплин Леонид Алексеевич^{1✉}, Буторин Владимир Андреевич²,
Андреева Марина Викторовна³

^{1,2}ФГБОУ ВО Южно-Уральский ГАУ, Челябинск, Россия

³ООО «Челябинский завод мобильных энергоустановок и конструкций», Челябинск, Россия

¹Isaplin49@mail.ru

Аннотация. Широкое использование в промышленности, энергетике и сельском хозяйстве теплообменных аппаратов выдвигает высокие требования к их надежности. Определение скорости коррозионного износа является актуальной задачей при определении ресурса теплообменника. Приведены факторы, влияющие на скорость коррозии, среди них выбраны основные, главным образом воздействующие на надежность теплообменных аппаратов. К ним относятся индекс равновесного насыщения воды карбонатом кальция – индекс Ланжелье (J), содержание в воде сульфатов (SO_4^{2-}), присутствие в ней хлоридов (Cl⁻). Целью исследования является определение уровней варьирования основных воздействующих факторов, влияющих на скорость коррозии, при проведении стендовых испытаний для оценки эксплуатационной долговечности модернизированных теплообменных аппаратов. Для получения статистических характеристик основных факторов, влияющих на скорость коррозии теплообменника, были обработаны данные лабораторных анализов скважинной воды методами теории вероятностей, выборка включала пробы воды из 21 скважины. Проверка данных по критерию хи-квадрат Пирсона показала, что рассматриваемые факторы распределены согласно нормальным законам. Для экспериментального определения скоростей коррозии согласно матрице планирования 2^3 были установлены уровни варьирования факторов для каждого режима работы теплообменного аппарата. При этом верхний уровень воздействующего фактора будет соответствовать «+3σ», а нижний уровень – «-3σ», где σ – среднее квадратическое отклонение фактора. В зависимости от требований, предъявляемых к стендовым испытаниям на надежность, зная плотности распределения воздействующих факторов, можно изменять уровни их варьирования при проведении экспериментов.

Ключевые слова: теплообменный аппарат, скорость коррозии, воздействующие факторы, уровни варьирования.

Для цитирования: Саплин Л. А., Буторин В. А., Андреева М. В. Уровни варьирования факторов при испытании на эксплуатационную долговечность модернизированных теплообменных аппаратов // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. 2026. № 2(86). С. 179-186. https://doi.org/10.48012/1817-5457_2026_2_179-186.

Актуальность. Теплообменные аппараты используются во многих технологических процессах в промышленности, энергетике и сельском хозяйстве. Такое оборудование должно быть надежным [1, 6]. Одним из ключевых показателей надежности является его ресурс [12–14]. Коррозия элементов теплообменников в 25-90 % случаев приводит к потере их работоспособности [2, 8]. Качество модернизированного оборудования оценивается рядом показателей, при этом надежность является основным при эксплуатации рассматриваемых объектов. Надежность модернизированных теплообменных аппаратов, включающая в себя определение законов распределения отказов и их параметров, можно

получить путем проведения эксплуатационных или стендовых испытаний. Эксплуатационные испытания не требуют разработки испытательного стенда, однако их проведение требует значительного периода времени, исчисляемого 5-10 годами, что может привести к ненужности конечных результатов. В настоящее время все более широкое применение, ведущее к значительному сокращению (в 10 и более раз) времени оценки ресурса, а также к значительному снижению числа необходимых для его определения объектов исследования, находят стендовые испытания на надежность [13]. Обзор проведенных исследований позволил установить методы сокращения времени проведения стендовых ис-

пытаний на коррозионное изнашивание. В целом эти методы можно разделить на две части [3, 13].

К первой части относятся методы с форсированием режимов нагрузки: увеличение числа циклов нагружения в единицу времени, увеличение абсолютной величины нагрузки, использование переменных режимов испытаний, усиление воздействия факторов окружающей среды, усиление воздействия абразивной среды. Основным недостатком использования методов с ужесточением режимов нагрузки по сравнению с эксплуатационными испытаниями является изменение картины изнашивания по сравнению с той же картиной при нормальной нагрузке. При этом возникают большие сложности в определении коэффициента ускорения испытаний. Все это приводит к снижению достоверности оценки надежности испытываемого объекта на форсированных режимах ускоренных стендовых испытаний.

Ко второй части относятся методы стендовых испытаний без ужесточения режимов нагрузки. К ним относится использование более точных методов контроля технического состояния, применение статистических методов анализа результатов, использование полнофакторного планирования эксперимента. Актуальность проведения оценки надежности обусловлена тем, что любые мероприятия, направленные на изменение конструкции, смену технологии, ремонта, должны быть проверены на надежность.

Оценка надежности теплообменных аппаратов проводилась путем реализации стендовых испытаний на нормальных режимах работы, при этом испытания проводились по плану полнофакторного эксперимента [16]. Для проведения полнофакторного эксперимента требуется определение верхнего и нижнего уровня воздействующих на коррозионное изнашивание факторов. Для определения воздействующих факторов необходимо установить законы их распределения. Агрессивность среды, в которой эксплуатируются теплообменные аппараты, влияет на скорость коррозии [10, 16]. Индекс равновесного насыщения воды карбонатом кальция – индекс Ланжелье (J), содержание в воде сульфатов (SO_4^{2-}), присутствие в ней хлоридов (Cl^-), являются наиболее агрессивными факторами, влияющими на скорость коррозии элементов водо-водяного теплообменника.

Цель исследования: определить уровни варьирования воздействующих факторов для про-

ведения стендовых испытаний на долговечность модернизированных теплообменных аппаратов путем установления законов распределения данных факторов.

Материал и методы. Теория вероятностей и математической статистики с применением методики многофакторного планирования эксперимента обеспечивает эффективность исследования процесса коррозионного изнашивания элементов теплообменного аппарата. Для его изучения необходимо установить факторы, влияющие на этот процесс [7, 12]. Данные факторы следует разделить на три группы:

Эксплуатационные факторы:

- а) наличие кислорода в водной среде (O_2);
- б) индекс равновесного насыщения воды карбонатом кальция – индекс Ланжелье (J);
- в) содержание в воде сульфатов (SO_4^{2-});
- г) содержание в воде хлоридов (Cl^-);
- д) температура воды (t°);
- е) механические нагрузки (M).

Технологические факторы:

- а) твердость рабочих поверхностей элементов теплообменного аппарата (H);
- б) качество изготовления отдельных элементов теплообменного аппарата (δ);
- в) качество сборки и испытания теплообменного аппарата (Δ).

Конструктивный фактор – размер теплообменного аппарата (μ).

В общем виде модель процесса изнашивания основных элементов теплообменного аппарата приведена на рисунке 1.

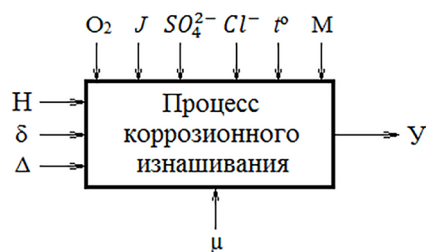


Рисунок 1 – Блок-схема процесса коррозионного изнашивания:

$У$ – скорость коррозионного изнашивания элементов теплообменного аппарата

Не все воздействующие факторы одинаково влияют на коррозионное изнашивание. Из данных факторов следует выделить только основные и имитировать их на стенде. Это позволяет существенно сократить период экспериментальных исследований [7]. Технологические и конструкционные факторы относятся к неуправляемым, поскольку для них трудно изменять

уровни воздействия на исследуемый процесс. Поэтому неуправляемые факторы варьироваться не будут: они должны быть, по возможности, контролируемыми.

Среди эксплуатационных факторов к незначимым относится фактор механической нагрузки (M), в связи с тем, что элементы теплообменного аппарата при эксплуатации практически не подвержены вибрациям и знакопеременным нагрузкам. Поэтому фактор (M) при испытаниях имитироваться не будет. Эксплуатационный фактор температура воды (t°) при эксперименте варьироваться не будет, поскольку матрица планирования будет реализовываться для двух температурных режимов: стояночного и режима применения по назначению. Наличие кислорода в воде (O_2) также приниматься во внимание не будет, поскольку оно носит слабое влияние на коррозионное изнашивание ввиду его незначительного количества в воде при скважинном водоснабжении.

При исследовании агрессивности среды, в которой работают теплообменные аппараты, при проведении стендовых испытаний следует учитывать следующие эксплуатационные факторы [10, 15]: индекс равновесного насыщения воды карбонатом кальция – индекс Ланжелъе (J), содержание в воде сульфатов (SO_4^{2-}), присутствие в ней хлоридов (Cl^-).

Использование теплообменного аппарата в качестве источника горячего водоснабжения предполагает его эксплуатацию в двух режимах: в режиме применения по назначению и стояночном режиме, при котором получение горячей воды не предусмотрено. Каждому из режимов соответствует своя температура эксплуатации. Индекс Ланжелъе зависит от температуры воды, следовательно, этот фактор необходимо рассматривать при двух температурах.

Для получения статистических характеристик основных факторов, влияющих на скорость коррозии теплообменника, были обработаны данные лабораторных анализов скважинной воды методами теории вероятностей [4, 5], выборка включала пробы воды из 21 скважины.

Результаты исследований. Проверка данных по критерию хи-квадрат Пирсона показала, что рассматриваемые факторы распределены согласно нормальным законам с вероятностью 99 %, так как наблюдаемые значения критерия $\chi^2_{\text{наб}}$ оказались меньше его табличного значения ($\chi^2_{\text{табл}} = 11,34$) при уровне значимости 0,01 и числе степеней свободы 3, определяемом для нормального распределения для двух оцененных параметров выборки – математического ожидания и среднеквадратического отклонения – по выражению [4, 5]:

$$K = S - 3, \quad (1)$$

где S – количество интервалов.

Наблюдаемые значения критерия $\chi^2_{\text{наб}}$ факторов, влияющих на скорость коррозии элементов водо-водяного теплообменника, имеют следующие значения: для плотности распределения сульфатов – 0,7, для плотности распределения хлоридов – 1,6, для плотности распределения индекса Ланжелъе – 1,72. Результаты проверки приведены в таблицах 1-4. Параметры распределения факторов представлены в таблице 5.

Функции плотности распределения выбранных факторов описываются выражениями 2, 3, 4, 5.

Плотность распределения индекса Ланжелъе при температуре 70 °C:

$$f(U_{70^\circ}) = 1,078e^{[-3,649(U_{70^\circ})+2,3]^2}. \quad (2)$$

Таблица 1 – Проверка гипотезы принадлежности опытного распределения сульфатов в скважинной воде к нормальному закону

№ п/п	Границы интервала	Среднее значение интервала, $X_{cp\ i}$	Частота в интервале, n_i	$X_{cp\ i} \cdot n_i$	Взвешенное квадратическое отклонение, $(X_{cp\ i} - \bar{X})^2/n_i$	Теоретическая частота, $\tilde{n}_i$	$n_i - \tilde{n}_i$	Наблюдаемое значение критерия согласия, $(n_i - \tilde{n}_i)^2/\tilde{n}_i$
1	1,8-20,7	11,2	1	11,2	2532,1	1,2	-0,2	0,03
2	20,7-39,5	30,1	3	90,3	329,7	3,6	-0,6	0,1
3	39,5-58,4	49,0	5	244,9	31,6	6,0	-1,0	0,2
4	58,4-77,3	67,8	6	407,1	6,6	7,2	-1,2	0,2
5	77,3-96,2	86,7	5	433,6	126,6	6,0	-1,0	0,2
6	96,2-115,0	105,6	1	105,6	1937,8	1,2	-0,2	0,0
	Σ	-	21	1292,6	4964,4	25,2	-	0,7

Таблица 2 – Проверка гипотезы принадлежности опытного распределения хлоридов в скважинной воде к нормальному закону

№ п/п	Границы интервала	Среднее значение интервала, $X_{cp\ i}$	Частота в интервале, n_i	$X_{cp\ i} \cdot n_i$	Взвешенное квадратическое отклонение, $(X_{cp\ i} - \bar{X})^2/n_i$	Теоретическая частота, $\tilde{n}_i$	$n_i - \tilde{n}_i$	Наблюдаемое значение критерия согласия, $(n_i - \tilde{n}_i)^2/\tilde{n}_i$
1	1,0-10,0	5,5	2	11,0	210,2	2,6	-0,6	0,2
2	10,0-18,9	14,5	4	57,8	33,2	5,3	-1,3	0,3
3	18,9-27,9	23,4	6	140,6	1,1	7,9	-1,9	0,5
4	27,9-36,9	32,4	5	162,0	8,2	6,6	-1,6	0,4
5	36,9-45,9	41,4	3	124,1	78,8	4,0	-1,0	0,2
6	54,9-54,8	50,3	1	50,3	592,3	1,3	-0,3	0,1
	Σ	-	21	545,7	923,9	27,7	-	1,6

Таблица 3 – Проверка гипотезы принадлежности опытного распределения индекса Ланжелъе при 40 °С в скважинной воде к нормальному закону

№ п/п	Границы интервала	Среднее значение интервала, $X_{cp\ i}$	Частота в интервале, n_i	$X_{cp\ i} \cdot n_i$	Взвешенное квадратическое отклонение, $(X_{cp\ i} - \bar{X})^2/n_i$	Теоретическая частота, $\tilde{n}_i$	$n_i - \tilde{n}_i$	Наблюдаемое значение критерия согласия, $(n_i - \tilde{n}_i)^2/\tilde{n}_i$
1	-3,85...-3,36	-3,61	1	-3,61	1,70	1,33	-0,33	0,08
2	-3,36...-2,87	-3,12	3	-9,35	0,22	3,99	-0,99	0,25
3	-2,87...-2,38	-2,63	6	-15,77	0,02	7,98	-1,98	0,49
4	-2,38...-1,89	-2,14	5	-10,69	0,01	6,65	-1,65	0,41
5	-1,89...-1,41	-1,65	4	-6,60	0,11	5,32	-1,32	0,33
6	-1,41...-0,92	-1,16	2	-2,32	0,65	2,66	-0,66	0,16
	Σ	-	21	-48,33	2,70	27,94	-	1,72

Таблица 4 – Проверка гипотезы принадлежности опытного распределения индекса Ланжелъе при 70 °С в скважинной воде к нормальному закону

№ п/п	Границы интервала	Среднее значение интервала, $X_{cp\ i}$	Частота в интервале, n_i	$X_{cp\ i} \cdot n_i$	Взвешенное квадратическое отклонение, $(X_{cp\ i} - \bar{X})^2/n_i$	Теоретическая частота, $\tilde{n}_i$	$n_i - \tilde{n}_i$	Наблюдаемое значение критерия согласия, $(n_i - \tilde{n}_i)^2/\tilde{n}_i$
1	-2,97...-2,48	-2,73	1	-2,73	1,69	1,33	-0,33	0,08
2	-2,48...-2,00	-2,24	3	-6,72	0,22	3,99	-0,99	0,25
3	-2,00...-1,51	-1,75	6	-10,52	0,02	7,98	-1,98	0,49
4	-1,51...-1,02	-1,27	5	-6,33	0,01	6,65	-1,65	0,41
5	-1,02...-0,54	-0,78	4	-3,11	0,11	5,32	-1,32	0,33
6	-0,54...-0,05	-0,29	2	-0,58	0,65	2,66	-0,66	0,16
	Σ	-	21	-29,98	2,68	27,94	-	1,72

Таблица 5 – Параметры распределения факторов

Название фактора	Среднее значение	Среднеквадратическое отклонение
Индекс Ланжелъе при 40 °С	-2,30	0,37
Индекс Ланжелъе при 70 °С	-1,43	0,37
Сульфаты, мг/дм ³	61,6	15,8
Хлориды, мг/дм ³	26,0	6,8

Плотность распределения индекса Ланжелье при температуре 40 °С:

$$f(U_{40}) = 1,078e^{[-3,649(U_{40})+1,43]^2}. \quad (3)$$

Плотность распределения содержания в воде сульфатов:

$$f(SO_4^{2-}) = 0,025e^{[-2,0 \cdot 10^{-3}(SO_4^{2-}-61,6)^2]}, \text{ дм}^3/\text{мг}. \quad (4)$$

Плотность распределения содержания в воде хлоридов:

$$f(Cl^-) = 0,059e^{[-0,011(Cl^- - 26,0)^2]}, \text{ дм}^3/\text{мг}. \quad (5)$$

Плотности распределения указанных факторов представлены на рисунках 2-4.

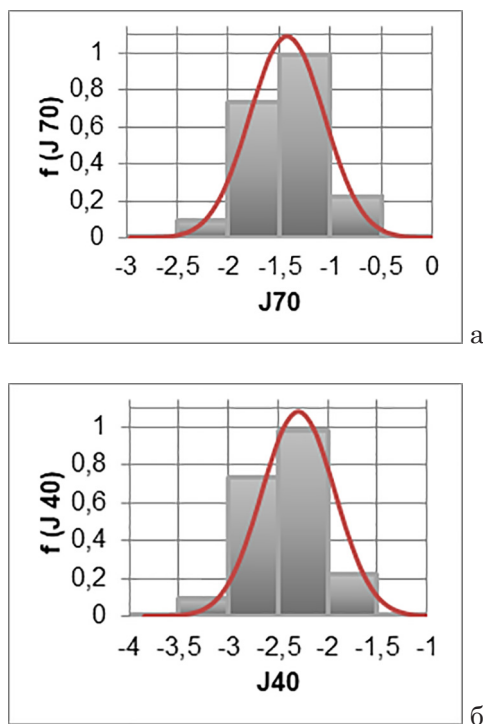


Рисунок 2 – Плотность распределения индекса Ланжелье: а – при 70 °С, б – при 40 °С

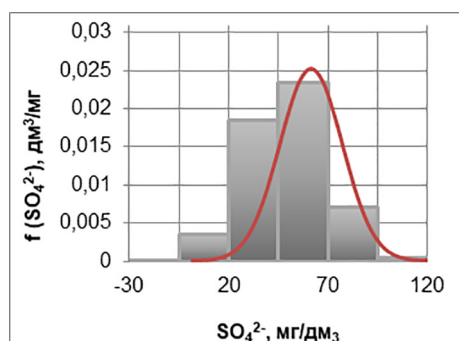


Рисунок 3 – Плотность распределения индекса сульфатов

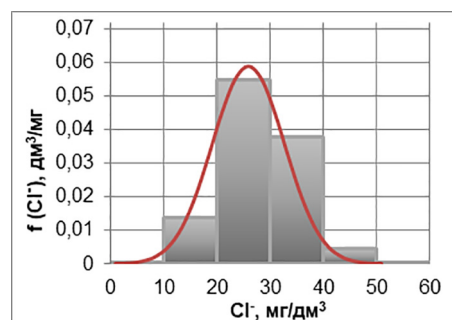


Рисунок 4 – Плотность распределения индекса хлоридов

Для экспериментального определения скоростей коррозии, согласно матрице планирования 2³, были установлены уровни варьирования факторов для каждого режима работы теплообменного аппарата (табл. 6, 7) [7, 8, 16].

Таблица 6 – Уровни варьирования факторов для режима применения по назначению

Название фактора	Уровни варьирования			Полуинтервал варьирования
	верхний (+1)	средний (0)	нижний (-1)	
Индекс Ланжелье при 40 °С	-1,19	-2,30	-3,41	1,11
Сульфаты, мг/дм ³	109,0	61,6	14,2	47,4
Хлориды, мг/дм ³	46,4	26,0	5,6	20,4

Таблица 7 – Уровни варьирования факторов для стояночного режима работы

Название фактора	Уровни варьирования			Полуинтервал варьирования
	верхний (+1)	средний (0)	нижний (-1)	
Индекс Ланжелье при 70 °С	-0,32	-1,43	-2,54	1,11
Сульфаты, мг/дм ³	109,0	61,6	14,2	47,4
Хлориды, мг/дм ³	46,4	26,0	5,6	20,4

При этом верхний уровень воздействующего фактора будет соответствовать «+3σ», а нижний уровень – «-3σ», где σ – среднеквадратическое отклонение фактора.

Выводы. Оценку качества модернизированных теплообменных аппаратов, основной характеристикой которой является надежность, целесообразно проводить на основании ускоренных стендовых испытаний. Для их реализации

необходимо установить уровни варьирования основных воздействующих на надежность факторов. Было доказано, что к ним относятся эксплуатационные факторы: индекс Ланжелье при 40 °С и 70 °С, содержание в воде сульфатов (SO_4^{2-}), присутствие в ней хлоридов (Cl^-). На основании обработки статистических данных выборки проб воды, взятых из 21 скважины, были установлены законы распределения основных воздействующих на надежность факторов. Были приведены их виды и математические выражения. Уровни варьируемых факторов при проведении стендовых испытаний брались из условия $\pm 3\sigma$ их эксплуатационных значений.

Список литературы

1. Буторин В. А., Андреева М. В. Детерминированная модель оценки ресурса кожухотрубных теплообменных аппаратов // Современные энергетические аспекты развития аграрной сферы: материалы Нац. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Ижевск: ФГБОУ ВО Удмуртский ГАУ, 2024. С. 64-68.
2. Буторин В. А., Гусейнов Р. Т., Царев И. Б. Моделирование влияния примесей песка в скважинной воде на ресурс упорного подшипника погружного электродвигателя // АПК России. 2023. Т. 30, № 2. С. 214-217.
3. Буторин В. А., Гусейнов Р. Т., Царев И. Б. Статистические распределения эксплуатационных факторов, влияющих на срок службы контактов магнитных пускателей пускозащитной аппаратуры погружных электродвигателей // Техника и оборудование для села. 2024. № 11 (329). С. 40-43.
4. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. 10-е изд., стер. Москва: Academia, 2005. 576.
5. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. Москва: Наука, 1991. 383 с.
6. Дадабаев Ш. Т., Абдуллазянов Э. Ю., Грачева Е. И. Мероприятия по повышению технического ресурса электрооборудования мощных оросительных насосных станций // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2023. Т. 25, № 2. С. 26-39.
7. Изаков Ф. Я. Планирование эксперимента и обработка опытных данных. Челябинск: ЧГАУ, 2003. 103 с.
8. Ковалев М. С., Чиж В. А. Анализ коррозионного состояния оборудования систем теплоснабжения // Актуальные проблемы энергетики – 2018: материалы студ. науч.-тех. конф. / сост.: И. Н. Прокопья, Т. А. Петровская. Минск: БНТУ, 2018. С. 556-270.
9. Многофакторное планирование эксперимента по определению силы прилипания грунта к машинам / С. А. Зеньков [и др.] // Механики XXI века. 2015. № 14. С. 251-256.
10. Моисеева Л. С., Углова Е. С. Автоматизированная вычислительная система поддержки принятия

решений в задачах коррозионной защиты «Барьер-СО[2]» // Нефтяное хозяйство. 2009. № 10. С. 112-113.

11. Надежность теплообменных аппаратов паротурбинных установок с учетом технологических и эксплуатационных факторов / П. Н. Плотников [и др.] // Тяжелое машиностроение. 2002. № 2. С. 38-40.

12. Параметры распределения ресурса упорного подшипникового узла скважинных электронасосов / С. А. Саплин [и др.] // АПК России. 2020. Т. 27, № 1. С. 130-134.

13. Планирование и результаты испытаний скорости относительного приращения тока утечки обмоток электродвигателей / С. А. Саплин [и др.] // Вестник Курганской ГСХА. 2023. № 4 (48). С. 65-67.

14. Тоиров И. Ж. Стендовые и эксплуатационные испытания подшипников качения на долговечность // Проблемы современной науки и образования. 2025. № 6 (205). С. 12-15.

15. Углова Е. С., Моисеева Л. С. Установление причин коррозии технологического участка в системе поддержания пластового давления нефтяного месторождения // Коррозия: материалы, защита. 2009. № 10. С. 20-25.

16. Цугленок Н. В. Планирование экспериментальных исследований по определению эффективных режимов ВЧ- и СВЧ-обработки семян // Modern Science: науч.-инф. изд. центр «Институт стратегических исследований». 2019. № 7-2. С. 24-27.

References

1. Butorin V. A., Andreeva M. V. Determinirovannaya model' ocenki resursa kozhuxotrubny'x teploobmennyy'x apparatov // Sovremennyy'e e'nergeticheskie aspekty' razvitiya agrarnoy sfery: materialy' Nacz. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem. Izhevsk: FGBOU VO Udmurtskiy GAU, 2024. S. 64-68.
2. Butorin V. A., Gusejnov R. T., Czarev I. B. Modelirovanie vliyaniya primesej peska v skvazhinnoj vode na resurs upornogo podshipnika pogruzhnogo e'lektrodvigatelya // APK Rossii. 2023. T. 30, № 2. S. 214-217.
3. Butorin V. A., Gusejnov R. T., Czarev I. B. Statisticheskie raspredeleniya e'kspluatacionny'x faktorov, vliyayushhix na srok sluzhby' kontaktov magnitny'x puskatel'ej puskoszashhitnoj apparatury' pogruzhny'x e'lektrodvigatelya // Texnika i oborudovanie dlya sela. 2024. № 11 (329). S. 40-43.
4. Ventcel' E. S. Teoriya veroyatnostej. 10-e izd., ster. Moskva: Academia, 2005. 576.
5. Ventcel' E. S., Ovcharov L. A. Teoriya sluchajny'x processov i ee inzhenerny'e prilozheniya. Moskva: Nauka, 1991. 383 s.
6. Dadabaev Sh. T., Abdullazyanov E. Yu., Gracheva E. I. Meropriyatiya po povysheniyu texnicheskogo resursa e'lektrooborudovaniya moshhny'x orositel'ny'x nasosny'x stancij // Izvestiya vysshix uchebny'x zavedenij. Problemy' e'nergetiki. 2023. T. 25, № 2. S. 26-39.
7. Izakov F. Ya. Planirovanie e'ksperimenta i obrabotka opyt'ny'x dannyx. Chelyabinsk: ChGAU, 2003. 103 s.

8. Kovalev M. S., Chizh V. A. Analiz korrozionnogo sostoyaniya oborudovaniya sistem teplosnabzheniya // Aktual'ny'e problemy' e'nergetiki – 2018: materialy' stud. nauch.-tex. konf. / sost.: I. N. Prokopenya, T. A. Petrovskaya. Minsk: BNTU, 2018. S. 556-270.

9. Mnogofaktornoe planirovanie e'ksperimenta po opredeleniyu sily' prilipaniya grunta k mashinam / S. A. Zen'kov [i dr.] // Mexaniki XXI veku. 2015. № 14. S. 251-256.

10. Moiseeva L. S., Uglova E. S. Avtomatizirovannaya vy'chislitel'naya sistema podderzhki prinyatiya reshenij v zadachax korrozionnoj zashhity' «Bar'er-SO[2]» // Nef'tyanoe xozyajstvo. 2009. № 10. S. 112-113.

11. Nadezhnost' teploobmennyy'x apparatov paroturbinnyy'x ustanovok s uchetom texnologicheskix i e'kspluatatsionny'x faktorov / P. N. Plotnikov [i dr.] // Tyazheloe mashinostroenie. 2002. № 2. S. 38-40.

12. Parametry' raspredeleniya resursa upornogo podshipnikovogo uzla skvazhinny'x e'lektronasosov / S. A. Saplin [i dr.] // APK Rossii. 2020. T. 27, № 1. S. 130-134.

13. Planirovanie i rezul'taty' ispy'tanij skorosti otnositel'nogo prirashheniya toka utehki obmotok e'lektrodvigatelej / S. A. Saplin [i dr.] // Vestnik Kurganskoj GSXA. 2023. № 4 (48). S. 65-67.

14. Toirov I. Zh. Stendovy'e i e'kspluatatsionny'e ispy'taniya podshipnikov kacheniya na dolgovechnost' // Problemy' sovremennoj nauki i obrazovaniya. 2025. № 6 (205). S. 12-15.

15. Uglova E. S., Moiseeva L. S. Ustanovlenie prichin korrozii texnologicheskogo uchastka v sisteme podderzhaniya plastovogo davleniya nef'tyanogo mestorozhdeniya // Korroziya: materialy', zashhita. 2009. № 10. S. 20-25.

16. Czuglenok N. V. Planirovanie e'ksperimental'ny'x issledovanij po opredeleniyu e'ffektivny'x rezhimov VCh- i SVCh-obrabotki semyan // Modern Science: nauch.-inf. izd. centr «Institut strategicheskix issledovanij». 2019. № 7-2. S. 24-27.

Сведения об авторах:

Л. А. Саплин^{1✉}, доктор технических наук, профессор;

В. А. Буторин², доктор технических наук, профессор;

М. В. Андреева³, ведущий инженер-проектировщик отдела АСУТП

^{1,2}ФГБОУ ВО Южно-Уральский ГАУ, 457103, Россия, Челябинск, пр. Ленина, 75

³ООО «Челябинский завод мобильных энергоустановок и конструкций», 454038, Россия, Челябинск, ул. Хлебозаводская, 5

¹Isaplin49@mail.ru

Original article

LEVELS OF VARIATION IN FACTORS DURING THE TESTING OF UPGRADED HEAT EXCHANGERS FOR OPERATIONAL DURABILITY

Leonid A. Saplin^{1✉}, Vladimir A. Butorin², Marina V. Andreeva³

^{1,2}South Ural State Agrarian University, Chelyabinsk, Russia

³Chelyabinsk Plant of Mobile Power Equipment and Structures, Chelyabinsk, Russia

¹Isaplin49@mail.ru

Abstract. The widespread use of heat exchangers in industry, energy sector, and agriculture imposes high reliability requirements on them. Measuring the rate of corrosion wear is crucial for estimating the lifespan of a heat exchanger. The article presents the factors affecting the rate of corrosion, and the main ones are selected, mainly affecting the reliability of heat exchangers. These include the index of equilibrium saturation of water with calcium carbonate – Langelier index (J), the content of sulfates in water (SO_4^{2-}), and chlorides (Cl^-). The purpose of the study is to determine the levels of variation of the main influencing factors affecting the corrosion rate during bench tests to assess the operational durability of upgraded heat exchangers. To obtain the statistical characteristics of the main factors affecting the corrosion rate of the heat exchanger, the data from laboratory analyses of well water were processed using probability theory methods, and the sampling included water samples from 21 wells. The Pearson's chi-square test showed that the factors under consideration are distributed according to normal laws. To experimentally determine the corrosion rates, the levels of factor variation were established for each operating mode of the heat exchanger according to the 23 factor planning matrix. The upper level of the affecting factor corresponds to "+3σ," and the lower level corresponds to "-3σ," where σ is the standard deviation of the factor. Depending on the requirements for bench tests for reliability, understanding the distribution densities of the affecting factors, it is possible to adjust their variation levels during the experiments.

Key words: heat exchanger, corrosion rate, affecting factors, levels of variation.

For citation: Saplin L. A., Butorin V. A., Andreeva M. V. Levels of variation in factors during the testing of upgraded heat exchangers for operational durability. The Bulletin of Izhevsk State Agricultural Academy. 2026; 2(86): 179-186. (In Russ.). https://doi.org/10.48012/1817-5457_2026_2_178-186.

Authors:**L. A. Saplin**^{1✉}, Doctor of Technical Sciences, Professor;**V. A. Butorin**², Doctor of Technical Sciences, Professor;**M. V. Andreeva**³, Leading Design Engineer of the Automated Control System Department^{1,2}South Ural State Agrarian University, 75 Lenina St., Chelyabinsk, Russia, 457103³Chelyabinsk Plant of Mobile Power Equipment and Structures, 5 Khlebozavodskaya St., Chelyabinsk, Russia, 454038¹lsaplin49@mail.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: the authors declare that they have no conflict of interests.

Статья поступила в редакцию 16.01.2026; одобрена после рецензирования 25.03.2026;

принята к публикации 05.06.2026.

The article was submitted 16.01.2026; approved after reviewing 25.03.2026; accepted for publication 05.06.2026.

Научная статья

УДК 631.25:697.947

DOI 10.48012/1817-5457_2026_2_186-192

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И НАСЫЩЕНИЕ МОЛЕКУЛ ОЗОНА И ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ В РЕМОНТНО-ДИАГНОСТИЧЕСКИХ МАСТЕРСКИХ

Сторчевой Владимир Федорович^{1✉}, **Сторчевой Александр Владимирович**²,
Тимашева Дильбар Даяновна³, **Королев Даниил Иванович**⁴,
Хайретдинова Карина Тагировна⁵^{1,3,4,5}Московский авиационный институт, Москва, Россия²Российский биотехнологический университет, Москва, Россия¹V_Storchevoy@mail.ru

Аннотация. Приведены результаты исследования систем озонирования, распределения и насыщения молекул озона и отрицательных ионов в ремонтно-диагностических мастерских. Система очистки воздуха, совмещенная с озонаторами (коронного и барьерного разряда) и датчиками (концентрации вредных веществ, озона, отрицательных ионов, температуры), позволяет снижать вредное содержание пыли, газов и микроорганизмов в ремонтно-диагностических мастерских до предельно допустимых концентраций. Получены зависимости изменения концентраций ионов и озона в ремонтно-диагностическом помещении и длительность сохранности этих концентраций после отключения систем озонирования и ионизации. Определены концентрации молекул озона: на выходе озонатора – 21 мг/м³ (38 %), на расстоянии 2 м от сопла озонатора – 1 мг/м³ (2 %), отрицательных ионов: на выходе озонатора – 2500 пКл/м³ (33 %), в воздушной струе на расстоянии 2 м от сопла озонатора – 580 пКл/м³ (3 %). Концентрация насыщения молекул озона и отрицательных ионов в струе воздушной массы в зависимости от времени работы озонатора (30 мин.) составляет 52 %: по молекулам озона – 15 мг/м³, отрицательным ионам – 2800 пКл/м³. Распределение молекул озона и отрицательных ионов в струе воздушной массы при отключении озонатора: разложение молекул озона и отрицательных ионов еще длится с теми же концентрациями 15 мин., что составляет 46 %, через 30 мин. после отключения концентрации снижаются к нулю. Получены уравнения изменения концентраций молекул озона и отрицательных ионов в профилях движения воздушной массы струи озонатора.

Ключевые слова: система озонирования воздуха, микроклимат, концентрации вредных веществ и микроорганизмов в воздухе, концентрации ионов и озона.

Для цитирования: Распределение и насыщение молекул озона и отрицательных ионов в ремонтно-диагностических мастерских / В. Ф. Сторчевой, А. В. Сторчевой, Д. Д. Тимашева [и др.] // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. 2026. № 2(86). С. 186-192. https://doi.org/10.48012/1817-5457_2026_2_186-192.