

DOI: 10.22363/1815-5235-2025-21-6-551-564
EDN: FPZIWY

Научная статья / Research article

Диагностика состояния конструкций в условиях вибрационных нагрузок и повышенных температур

С.Н. Якупов¹, Р.Р. Гиниятуллин¹, Н.М. Якупов¹, В.Г. Низамеев², М.И. Рынковская³¹ Институт механики и машиностроения ФИЦ Казанский научный центр РАН, Казань, Российская Федерация² ООО «РЕМСТРОЙПРОМПРОЕКТ», Казань, Российская Федерация³ Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

✉ rynkovskaya-mi@rudn.ru

Поступила в редакцию: 11 сентября 2025 г.

Доработана: 11 ноября 2025 г.

Принята к публикации: 30 ноября 2025 г.

Аннотация. Промышленные строительные конструкции работают в тяжелых эксплуатационных условиях. Ярким примером таких конструкций являются вентиляторные градирни, которые воспринимают существенные вибрационные нагрузки, вызываемые от работающего вентилятора; при этом внутренние поверхности конструкций испытывают воздействие относительно высоких температур от контакта с охлаждаемой водой, а наружные поверхности находятся постоянно под воздействием окружающей среды. Известный подход диагностики конструкции не учитывает изменение интегральных механических свойств тонкостенных элементов конструкций и образование локальных углублений и сквозных отверстий. На примере крупногабаритной вентиляторной градирни описан подход диагностики конструкций, подверженных воздействию вибрации от работающего вентилятора и температуры охлаждаемой воды, а также окружающей среды. Экспериментально-теоретическим методом исследовано влияние вибрации и температуры на процесс коррозионного износа тонкостенных элементов конструкций. На базе нового варианта метода конечных элементов, развитого для расчета конструкций в цилиндрической системе координат, исследовано исходное и актуальное состояние металлической части вентиляторной градирни с учетом пластических деформаций. При расчете актуального состояния были учтены коррозионные дефекты и изменения жесткостных свойств тонкостенных элементов, возникших в процессе эксплуатации в результате комплексного воздействия вибрации и относительно высоких температур. Установлено, что наличие вибрации и повышенная температура среды способствуют ускоренной коррозии; при этом с увеличением температуры и времени воздействия вибрации эффект усиливается. Коррозионный износ приводит к существенному росту напряжений и образованию пластических деформаций, что обуславливает перераспределение напряжений. Отмечено, что обнаруженные эффекты необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации металлических конструкций, испытывающих существенные вибрационные нагрузки и работающих при высоких температурах.

Якупов Самат Нухович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр РАН», Институт механики и машиностроения, Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. Лобачевского д. 2/31; eLIBRARY SPIN-код: 7382-4759, ORCID: 0000-0003-0047-3679; e-mail: tamas_86@mail.ru


Гиниятуллин Ришат Рашидович, кандидат технических наук, научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр РАН», Институт механики и машиностроения, Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. Лобачевского д. 2/31; eLIBRARY SPIN-код: 7606-3211, ORCID: 0000-0003-2176-6913; e-mail: true_way@mail.ru

Якупов Нух Махмудович, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр РАН», Институт механики и машиностроения, Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. Лобачевского д. 2/31; eLIBRARY SPIN-код: 2933-5615, ORCID: 0000-0001-8248-1589; e-mail: yzsrr@mail.ru

Низамеев Васил Габдулхаевич, кандидат физико-математических наук, главный инженер проектов, ООО «РЕМСТРОЙПРОМПРОЕКТ», Российская Федерация, 421001, г. Казань, ул. Чистопольская, д. 75, офис 16; eLIBRARY SPIN-код: 8079-8186, ORCID: 0000-0001-8525-7611; e-mail: nizameev@kgasu.ru

Рынковская Марина Игоревна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологий строительства и конструкционных материалов, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; eLIBRARY SPIN-код: 9184-7432; ORCID: 0000-0003-2206-2563; e-mail: rynkovskaya-mi@rudn.ru

© Якупов С.Н., Гиниятуллин Р.Р., Якупов Н.М., Низамеев В.Г., Рынковская М.И., 2025

 This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Ключевые слова: тонкостенные конструкции, вентиляционная градирня, коррозионный износ, экспериментально-теоретический метод, механические свойства, тонкостенные элементы, дефекты, высокая температура, интерполяционные сплайны, вариант метода конечных элементов, напряженно-деформированное состояние, упругие и пластические деформации

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов: Якупов Н.М. — концептуализация, методология, написание текста – первоначальный вариант; Гиниятуллин Р.Р., Якупов С.Н. — проверка достоверности, исследование (экспериментальный метод), визуализация; Низамеев В.Г. — обработка данных, формальный анализ; Рынковская М.И. — рецензирование и редактирование. Все авторы ознакомились с окончательной версией статьи и одобрили ее.

Благодарности. Исследование выполнено в рамках государственного задания машиностроения ФИЦ КазНЦ РАН, г. Казань, Российская Федерация.

Для цитирования: Якупов С.Н., Гиниятуллин Р.Р., Якупов Н.М., Низамеев В.Г., Рынковская М.И. Диагностика состояния конструкций в условиях вибрационных нагрузок и повышенных температур // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2025. Т. 21. № 6. С. 551–564. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2025-21-6-551-564> EDN: FPZIWY

Diagnostics of Structures under Vibration Loads and Elevated Temperatures

Samat N. Yakupov¹, Rishat R. Giniyatullin¹, Nukh M. Yakupov¹,
Vasil G. Nizameyev², Marina I. Rynkovskaya³

¹ Federal research center “Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences,” Kazan, Russian Federation

² REMSTROYPROMPROEKT LLC, Kazan, Russian Federation

³ RUDN University, Moscow, Russian Federation

✉ rynkovskaya-mi@rudn.ru

Received: September 11, 2025

Revised: November 22, 2025

Accepted: November 30, 2025

Abstract. Industrial building structures operate under severe conditions. An apt example of such structures are fan cooling towers, which resist significant vibration loads caused by a running fan; at the same time, the internal surfaces of the structures are exposed to relatively high temperatures from contact with cooled water, and the external surfaces are constantly exposed to the environment. The well-known approach to structural diagnostics does not take into account changes in the integral mechanical properties of thin-walled structural elements and the formation of local depressions and holes. Using the example of a large-sized fan cooling tower, an approach to diagnostics of structures affected by vibration from a running fan and the temperature of the cooled water, as well as the environment, is described. The effect of vibration and temperature on the process of corrosion wear of thin-walled structural elements has been studied experimentally and theoretically. Based on a new version of the finite element method developed for calculating structures in a cylindrical coordinate system, the initial and current state of the metal part of the fan cooling tower is investigated, taking into account plastic deformations. When analyzing the current state, corrosion defects and changes in the stiffness properties of thin-walled elements caused during operation as a result of the combined effects of vibration and relatively high temperatures were taken into account. It has been established that the presence of vibration and elevated ambient temperature contribute to accelerated corrosion; at the same time, the effect increases with increasing temperature and time of exposure to vibration. Corrosion wear leads to a significant increase in stresses and the formation of plastic deformations, which leads to a redistribution of stresses. It is noted that the discovered effects must be taken into account in the design and service of metal structures that experience significant vibration loads and operate at high temperatures.

Keywords: thin-walled structures, fan cooling tower, corrosion wear, experimental and theoretical method, mechanical properties, thin-walled elements, defects, high temperature, interpolation splines, finite element method variant, stress-strain state, elastic and plastic deformations

Conflicts of interest. The authors declare that there is no conflict of interest.

Authors' contribution: Yakupov N.M. — conceptualization, methodology, text writing — initial version; Giniyatullin R.R., Yakupov S.N. — validation, research (experimental method), visualization; Nizameyev V.G. — data processing, formal analysis; Rynkovskaya M.I. — review and editing. All of the authors read and approved the final version of the article.

Acknowledgments: The research was carried out within the framework of the state Assignment of mechanical Engineering of the FITC KazNC RAS, Kazan, Russian Federation.

For citation: Yakupov S.N., Giniyatullin R.R., Yakupov N.M., Nizameyev V.G., Rynkovskaya M.I. Diagnostics of structures under vibration loads and elevated temperatures. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2025;21(6): 551–564. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2025-21-6-551-564> EDN: FPZIWY

1. Введение

Строительные конструкции вентиляторной градирни (рис. 1, *а*, *б*) представляют собой сложную пространственно искривленную систему из железобетона и стальных конструкций. Наклонные стойки и цилиндрическая часть градирни выполнены из железобетона [1]. Металлическая часть состоит из конфузора — сужающейся усеченной конической оболочки, горловины — фрагментов тороидальной и цилиндрической оболочек и диффузора — расширяющейся усеченной конической оболочки. Оболочки толщиной 4 мм подкреплены с наружной стороны продольным и поперечным набором в виде швеллеров, уголков и пластин. На уровнях горловины и вблизи верхнего среза диффузора конструкция усилена шпангоутами, которые фиксируются к корпусу градирни стержнями. В конструкции градирни имеются технологические окна, а также площадки и лестничная система для обслуживания.



Рис. 1. Крупногабаритная градирня:
а — общий вид; *б* — металлическая часть
 И с т о ч н и к: выполнено Н.М. Якуповым.

На конструкцию градирни, помимо ветровой, вакуумной, и весовой нагрузки, действует вибрационная нагрузка. Вакуумная и вибрационная нагрузки возникают в эксплуатационный период при работе вентилятора. Внутренние поверхности конструкций испытывают воздействие относительно высоких температур от контакта с охлаждаемой водой (до 60 °С и выше), а наружные поверхности и часть внутренней поверхности находятся постоянно под воздействием температуры окружающей среды.

Тяжелые эксплуатационные условия способствуют интенсивному коррозионному износу. Натурные обследования состояния строительных конструкций ряда градирен показали, что наиболее сильному коррозионному износу подвержены железобетонные опоры и часть металлической оболочки.

В процессе эксплуатации более 20 лет прочность бетона для некоторых стоек существенно уменьшилась. Происходит процесс разрыхления бетона, возникают микро- и макротрещины, появляются очаги коррозии в арматуре. В результате наблюдается снижение прочностных свойств несущих железобетонных конструкций. На рис. 2 и 3 представлены фрагменты наиболее изношенных областей 1, 2 и 3 (по рис. 1) железобетонных элементов конструкций.

В металлической части градирни максимальному коррозионному износу подвержена зона горловины, где имеют место максимальные скорости потока воздушной среды, большие вибрационные нагрузки и наибольшее температурное воздействие. В результате интенсивной коррозии толщина оболочки значи-

тельно уменьшилась, в частности, в области горловины толщина уменьшилась до 2 мм. Имеется большое количество сквозных отверстий и локальных углублений. Ряд панелей оболочки превратились в «решето». Такая картина наблюдается в зоне горловины и в нижних частях конфузора и диффузора. Активный коррозионный износ происходит в местах соединения панелей, в узких зазорах между элементами панелей и над ребрами жесткости. Подкрепляющие элементы градири, вследствие расположения снаружи, имеют меньший износ. На рис. 3 представлены некоторые фрагменты наиболее изношенных элементов конструкций в области опоры конфузора на верхнее железобетонное кольцо (область 4 по рис. 1) и области горловины (область 5 по рис. 1).

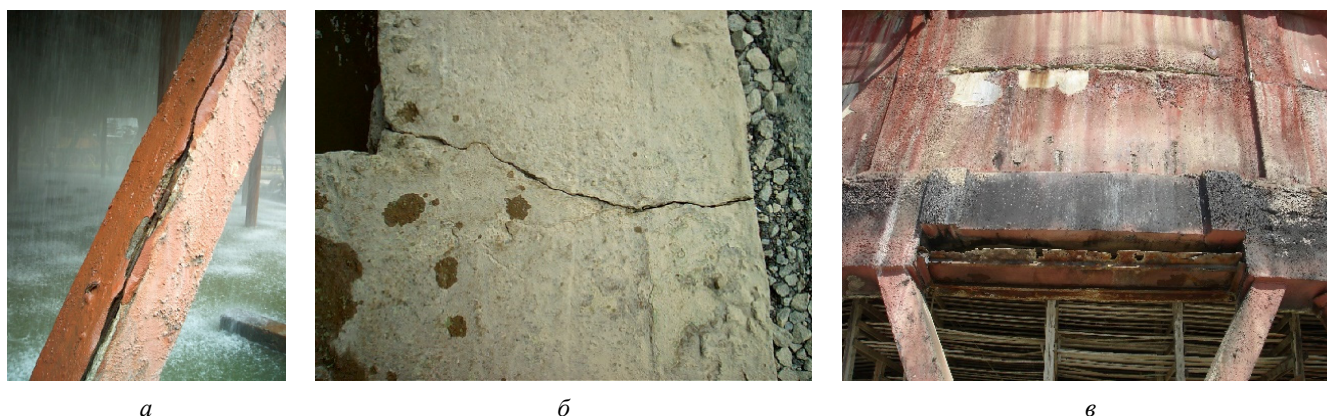


Рис. 2. Дефекты (по рис. 1):

a — в районе наклонных стоек; *б* — в районе основания; *в* — в цилиндрической части

И с т о ч н и к: выполнено Н.М. Якуповым.

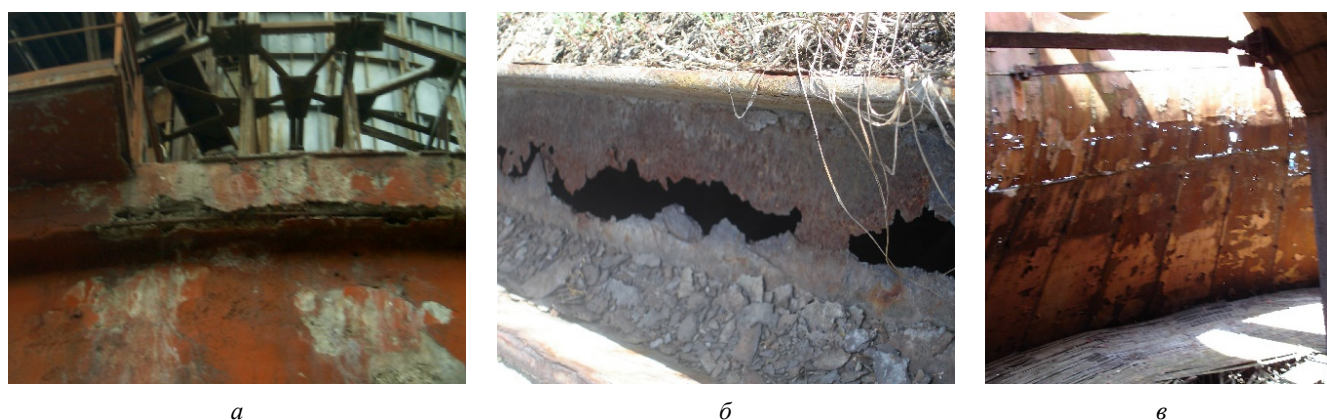


Рис. 3. Дефекты:

a — в районе верхнего железобетонного кольца; *б* — в конфузоре в районе железобетонного кольца;
в — в районе шейки (вид изнутри)

И с т о ч н и к: выполнено Н.М. Якуповым.

Коррозия металлов — это физико-химическое взаимодействие металла со средой — окисление металла с образованием продуктов коррозии (ржавчины), в результате уменьшаются геометрические параметры элементов конструкций. При этом поверхностные слои элементов конструкций разрыхляются на некоторую глубину или на всю глубину для тонкостенных элементов, что приводит к изменению механических свойств элемента.

На поверхности металла, находящегося в водной или другой среде, образуется тонкий защитный пассивирующий слой (рис. 4), при разрушении которого начинается коррозионное разрушение [2].

Очевидно, на разрушение пассивирующего защитного слоя влияют различные факторы: физические и механические поля, среда и температура и др.

Влияние напряженно-деформированного состояния на кинетику коррозионных процессов были рассмотрены авторами ранее. Исследования показали, что увеличение уровня растягивающих напряжений способствует разрушению защитного слоя и тем самым приводит к ускорению коррозионного износа. При анализе работы конструкций, особенно тонкостенных, подвергающихся коррозии, помимо изменения геометрических параметров необходимо принять во внимание изменение приведенных механических свойств, а также уровень и характер механических нагрузок.

Недостаточно изучено влияние различных физических полей на состояние защитного пассивирующего слоя. Влияние активного магнитного поля на процесс коррозии отмечено в [3–10].

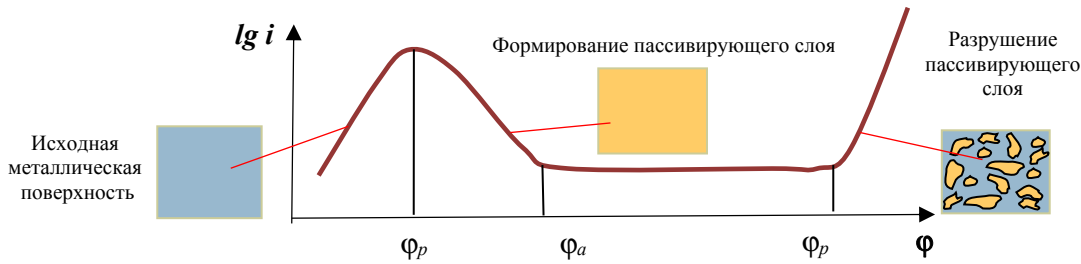


Рис. 4. Зависимость скорости анодного растворения металла i от потенциала ϕ
Источник: выполнено Н.М. Якуповым

При проектировании конструкций, как правило, задают величину износа материала за единицу времени (например, 0,1 мм в год). Такой подход не учитывает изменение интегральных механических свойств тонкостенных элементов конструкций, а также образование локальных углублений и сквозных отверстий. Результаты исследования тонкостенных балок с локальными дефектами приведены в [13]. Некоторые результаты исследования влияния окружающей среды на ползучесть и длительную прочность металлов представлены в [14–16]. Влияние вибрации на скорость коррозии защитных катодов из магния, алюминия и цинка в пресной и морской воде Персидского залива отмечено в [17]. Результаты исследования влияния вибрации возбуждения при высокотемпературной схеме обработки на механические характеристики и коррозионную стойкость литой стали под напряжением приведены в [18].

Цель исследования — разработка подхода диагностики тонкостенных конструкций, подверженных коррозионному износу, при наличии вибрации и повышенной температуры на примере крупногабаритной вентиляторной градирни. *Задачи исследования:* изучение влияния вибрации и температуры на процесс коррозионного износа тонкостенных элементов конструкций экспериментально-теоретическим методом; анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) исходного и актуального состояния металлической части вентиляторной градирни с учетом пластических деформаций на базе варианта метода конечных элементов [11], развитого для расчета напряженно-деформированного состояния конструкций в цилиндрической системе координат.

2. Метод

Для оценки степени коррозионного износа образцов, выдержанных определенное время в заданной среде при воздействии вибрации и температурного поля, используется экспериментально-теоретический метод [12], основанный на синтезе экспериментальных данных и теоретических соотношений, полученных из нелинейной теории оболочек. Этот метод является эффективным методом оценки интегральных жесткостных характеристик различных тонкостенных элементов сложной структуры. Изображение схемы установки для плоских образцов приведено на рис. 5.

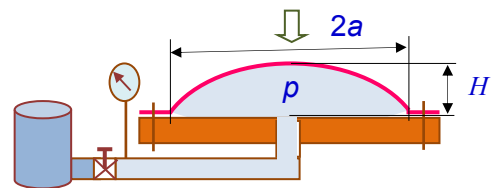


Рис. 5. Схема экспериментальной установки
Источник: выполнено Н.М. Якуповым.

Круглые образцы, выдержанные заданное время в исследуемой среде при воздействии вибрации и температуры, закрепляются по контуру и нагружаются равномерным давлением p . В процессе увеличения давления p производится мониторинг формы купола, в частности, измеряется высота подъема вершины купола H и строится график давление p — прогиб H . На теоретическом этапе, используя соотношения, полученные из нелинейной теории оболочек для случая среднего изгиба, и экспериментальную зависимость прогиб H — давление p для металлических образцов, вычисляется приведенная тангенциальная жесткость на растяжение-сжатие B и приведенная жесткость на изгиб D [12]:

$$B = 0,3037 p a \left(\frac{a}{H} \right)^3, \quad D = 0,0253 p \frac{a^4 h^2}{H^3}, \quad (1)$$

а также модуль упругости, по формуле

$$E = \frac{0,303 p a^4 (1 - \nu^2)}{h H^3}, \quad (2)$$

где h и a — толщина и радиус рабочей части; ν — коэффициент Пуассона.

3. Результаты

3.1. Влияние вибрации на коррозионный износ

Выполнены исследования влияния вибрации на процесс коррозионного износа в водной среде стальных образцов Сталь 3 с исходной толщиной $h = 0,6$ мм.

Тонкие круглые образцы размещаются отдельно в емкостях со средой. Емкости размещаются на вибрирующей площадке. В частности, на площадке, прикрепленной к компрессору (частота вращения $n = 2800$ об / мин).

Рассмотрены варианты горизонтального и вертикального расположения образцов (рис. 6, а, б).

Образцы выдерживались в водной среде в течение заданного времени. Контрольная группа емкостей располагалась в спокойной от вибрации области. Степень коррозии образцов оценивалась экспериментально-теоретическим методом [12].

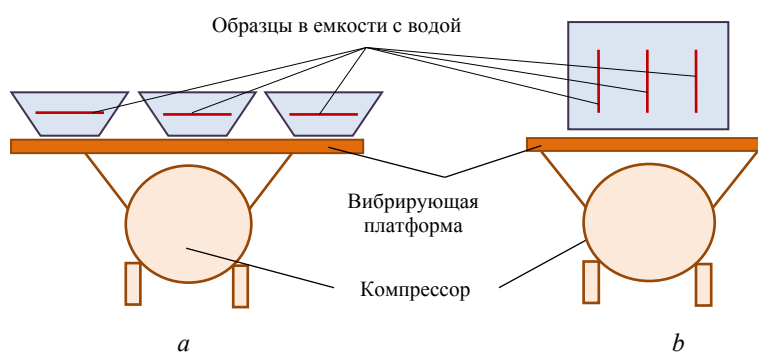


Рис. 6. Схемы размещения образцов на виброплатформе:
 а — горизонтальное расположение образцов; б — вертикальное расположение образцов
 Источник: выполнено Н.М. Якуповым.

В первой серии работ исследовались образцы, расположенные горизонтально на специальной площадке компрессора (рис. 6, а). Компрессор включался в автоматическом режиме в течение двух месяцев (за исключением воскресных дней) с 9.00 до 18.00 ч: компрессор в течение дня периодически включался (вибрация – 20 с) и выключался (без вибрации — 3 мин 40 с).

Во второй серии работ исследовались образцы, расположенные вертикально на специальной площадке компрессора (рис. 6, б). Компрессор работал в течение четырех месяцев в автоматическом режиме:

включался (вибрация) 30 с и выключался (без вибрации) 6 мин 10 с. В каждой серии работ рассматривалась контрольная группа образцов, которые не подвергались вибрации.

Экспериментально-теоретическим методом, отмеченным выше, для каждого образца определялась зависимость максимального прогиба H от давления p . По средним значениям максимальных прогибов образцов строились кривые давление p — прогиб H , которые представлены для первой серии работ на рис. 7, а, а для второй серии — на рис. 7, б.

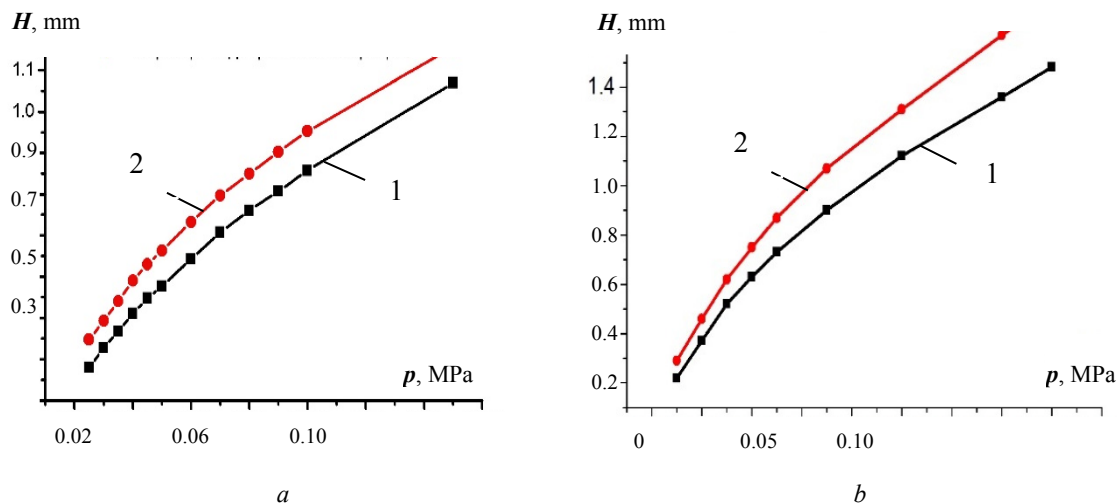


Рис. 7. Зависимости p – H расположены:
 а — горизонтально, б — вертикально; 1 — в состоянии покоя; 2 — при вибрации
 Источник: выполнено С.Н. Якуповым.

Как видно из графиков, в обеих сериях испытаний образцы из группы, подверженной вибрации (2), при одном и том же давлении прогибаются больше, чем образцы из контрольной группы (1), т.е. образцы под вибрацией подвергаются большему коррозионному износу, чем образцы из контрольной группы; этот вывод согласуется с замерами толщин образцов после коррозионного износа: средняя толщина образцов первой серии исследований, подверженных воздействию вибрации, составило 0,588 мм, в то время как средняя толщина образцов контрольной группы — 0,593 мм; для второй серии испытаний соответственно 0,556 и 0,569 мм.

Отмеченный вывод можно объяснить тем, что при вибрации создаются более благоприятные условия для разрушения пассивирующего слоя в электрохимическом процессе коррозии.

Таким образом, установлено влияние вибрации на процесс коррозионного износа стальных образцов, находящихся в водной среде, причем вибрация способствует более быстрому разрушению защитного пассивирующего слоя, образуемого в процессе коррозии, и тем самым способствует ускоренной коррозии.

Обнаруженный эффект имеет важное теоретическое значение при изучении явления коррозии как сложного электрохимического процесса под воздействием вибрации, а также практическое значение. Эффект необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации металлических конструкций, которые испытывают существенные вибрационные нагрузки — вентиляторные градирни, транспортные средства, трубопроводы и др.

Необходимо подчеркнуть, что вибрация возбуждения при высокой температуре эффективно устраняет остаточное напряжение литой стальной детали и может в определенной степени снизить внутреннюю твердость литых стальных деталей, однако в то же время способствует улучшению стрессоустойчивости коррозии [18].

3.2. Влияние температуры на коррозионный износ

Исследования влияния температуры на коррозионный процесс представляют определенный интерес, хотя исследования по этой теме встречаются редко. Увеличение коррозионного износа при 70 °С было обнаружено на угольной электростанции при исследовании стенок бойлера — замечено образование вяз-

ких отложений на стенках из-за конденсации кислот [19]. Увеличение восприимчивости к коррозионному растрескиванию под напряжением для некоторых сортов нержавеющей стали в растворе KCl при воздействии температуры отмечено в [20].

Выполнены экспериментальные исследования влияния температуры водной среды на коррозионный износ тонкостенных стальных образцов Сталь 3.

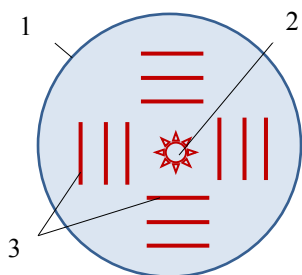


Рис. 8. Схема установки:

- 1 — цилиндрическая емкость;
2 — нагревательный элемент;
3 — обоймы с образцами

Источник: выполнено Н.М. Якуповым.

Алгоритм исследования. Разработана установка (рис. 8), состоящая из цилиндрической емкости (1) для заливки агрессивной жидкости.

В центре емкости расположен нагревательный элемент (2). По периметру емкости, на одинаковом расстоянии от центра, установлены обоймы с образцами (3). Для контроля температурного режима среды около образцов установлены датчики температуры.

В эксперименте, для реализации трех температурных режимов, использованы три установки, расположенные рядом друг с другом. Образцы, закрепленные в обойме, размещают в соответствующих емкостях с заданной средой и выдерживались заданное время. До начала и после эксперимента производился осмотр и замеры толщин исследуемых образцов.

Для оценки влияния температуры на коррозию круглых в плане тонкостенных образцов использован экспериментально-теоретический метод, отмеченный выше.

Металлические образцы из Сталь 3 толщиной 0,6 мм, подвергались коррозионному износу в течение 107 суток при температурных режимах $T_1 = 70\text{ }^\circ\text{C}$, $T_2 = 40\text{ }^\circ\text{C}$, $T_3 = 18\text{ }^\circ\text{C}$. Толщины образцов, подверженные коррозии под воздействием температурного поля, составили: $t_1 = 0,528\text{ мм}$, $t_2 = 0,576\text{ мм}$, $t_3 = 0,581\text{ мм}$, соответственно. Кривые «давление p — прогиб H » для рассмотренных образцов представлены на рис. 9.

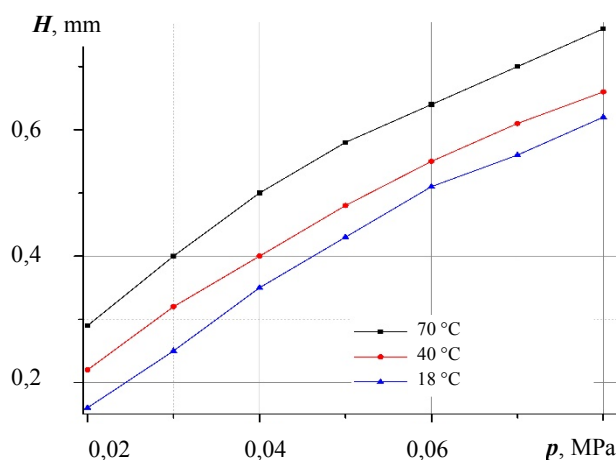


Рис. 9. Зависимости давление p — прогиб H

Источник: выполнено Р.Р. Гиниятуллиним.

Как видно из графиков (рис. 9), с увеличением температуры среды прогибы образцов увеличиваются, т.е. коррозионный износ возрастает. Модули упругости корродированных образцов, вычисленные по (2) при $p = 0,02\text{ МПа}$ составили: $E_1 = 1,778 \times 10^6\text{ МПа}$, $E_2 = 1,946 \times 10^6\text{ МПа}$, $E_3 = 2,051 \times 10^6\text{ МПа}$, соответственно.

На рис. 10 представлены изображения поверхности корродированных образцов при 4-, 10- и 400-кратном увеличении.

Как видно, при коррозии происходит разрыхление поверхности образцов на некоторую глубину, при этом при повышении температуры образуются каверны, которые при $70\text{ }^\circ\text{C}$ объединяются в большие области.

Таким образом, установлено, что температура среды существенно влияет на коррозионный износ тонкостенных стальных образцов. Повышение температуры среды способствует более быстрому разрушению защитного пассивирующего слоя, образуемого в процессе коррозии, и тем самым приводит к увеличению степени коррозионного износа.

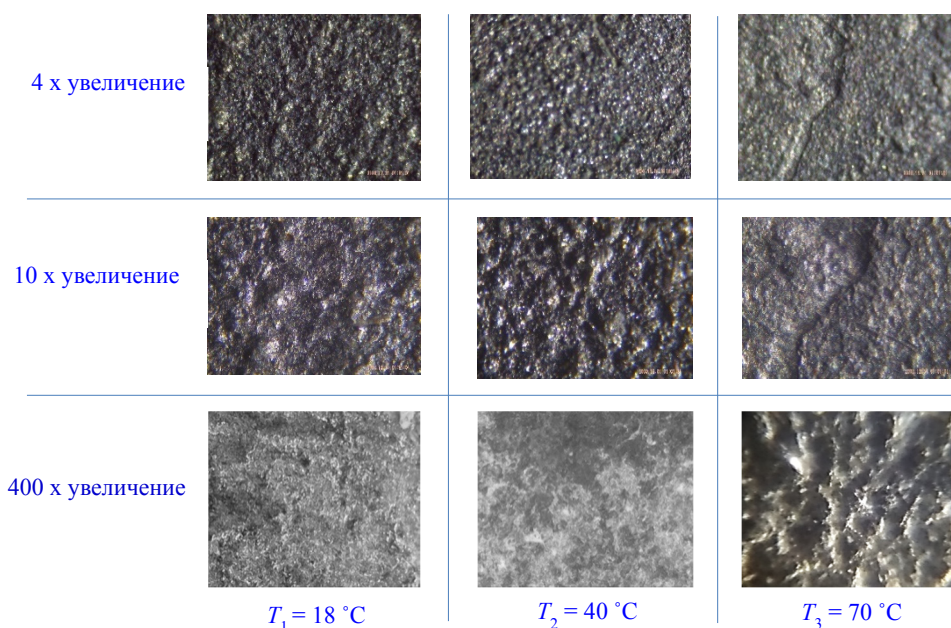


Рис. 10. Изображения поверхности корродированных образцов
И с т о ч н и к: выполнено Р.Р. Гиниятуллиным.

Установленный эффект имеет важное теоретическое значение при изучении сложного электрохимического процесса коррозии с учетом температуры среды. Также данный эффект важен в практическом применении, особенно для тонкостенных элементов конструкций, и его необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации металлических конструкций, которые в процессе работы взаимодействуют со средой повышенной температуры (в частности вентиляторные градирни, трубопроводы и др.)

3.3. Состояние конструкции градирни с коррозионными дефектами

Как отмечалось выше, строительные конструкции градирни находятся в тяжелых эксплуатационных условиях. Ветровые, вакуумные и весовые нагрузки, а также вибрация от работающих вентиляторов, высокие температуры охлаждаемой среды и солнечное излучение способствуют существенному коррозионному износу элементов конструкций. При этом образуются различные локальные углубления и сквозные отверстия, в тонкостенных элементах происходит изменение жесткостных свойств. Все это способствует увеличению уровня внутренних напряжений, появлению дополнительных концентраторов напряжений и снижению несущей способности всей конструкции.

В области коррозионного дефекта наблюдается изменение структуры материала поверхностного слоя. Этот факт практически не учитывается, хотя для тонкостенных элементов конструкций он может быть существенным. Изменение структуры поверхностного слоя может привести к существенному изменению интегральных механических свойств тонкостенных элементов конструкций. В связи с этим для расчета НДС металлической части конструкции градирни (см. рис. 1) предварительно определены экспериментально-теоретическим методом актуальные интегральные жесткостные характеристик тонкостенных элементов, вырезанных из конструкций во время ремонта. То есть при расчете были заложены реальные жесткостные свойства элементов конструкции, испытавшей, в частности, влияние вибрационных и температурных нагрузок в эксплуатационный период.

Для анализа НДС металлической части вентиляторной градирни использовался сплайновый вариант метода конечных элементов (*SV FEM-2*) [11], разработанный авторами и развитый для случая учета пла-

стических деформаций. Сплайновый вариант МКЭ основан на синтезе идеи предварительной параметризации срединной поверхности оболочки в цилиндрической системе координат и метода конечных элементов. Метод позволяет определять напряженно-деформированное состояние тонкостенных конструкций от статических нагрузок. При этом эффект влияния вибрации и температуры учитывается заданием актуальных интегральных жесткостных характеристик для элементов конструкций. Ниже приведены основные моменты сплайнового варианта метода конечных элементов (SV FEM-2)

■ *Параметризация срединной поверхности корпуса градирни.* Параметрическое уравнение в цилиндрической системе координат, использованное при расчете градирни, имеет вид

$$r(t^1, t^2) = x(t^1, t^2)i + \rho(t^1, t^2)e(t^1, t^2)e(t^1, t^2) = \sin \psi(t^1, t^2)j + \cos \psi(t^1, t^2)k, \quad (3)$$

где $x(t^1, t^2)$ — линейные координаты; $\psi(t^1, t^2)$ — угловые координаты; $\rho(t^1, t^2)$ — кратчайшее расстояние от оси OX до срединной поверхности оболочки; t^1, t^2 — параметры единичного квадрата; i, j, k — единичные векторы прямоугольных осей OX, OY, OZ .

Дифференцируя радиус-вектор R , определяем координатные векторы r_1 и r_2 , компоненты первого a_{jk} и второго b_{ik} метрического тензоров и символы Кристоффеля Γ_{jk}^i .

■ *Геометрические и физические соотношения.* Рассматривается случай среднего изгиба тонкой оболочки. При этом тангенциальные и изгибные деформации срединной поверхности по модели Кирхгоффа — Лява определяются по формулам [20]

$$2\varepsilon_{ik} = e_{ik} + e_{ki} + \omega_i \omega_k, \quad \kappa_{ik} = -\nabla_i \omega_k - b_i^s e_{ks}, \quad (4)$$

где $i, k, s = 1, 2$; ε_{ik} — ковариантные компоненты тензора тангенциальных деформаций; κ_{ik} — ковариантные компоненты деформаций изгиба и кручения; $\omega_i = \nabla_i w + b_i^k u_k$ — компоненты вектора поворота нормали m ; $e_{ik} = \nabla_i u_k - b_{ik} w$ — компоненты тензора поворота; ∇_i — знак ковариантного дифференцирования относительно a_{ik} ; u_k, w — ковариантные компоненты вектора перемещения ($u_1 = u, u_2 = v$), b_i^s — смешанные компоненты второго метрического тензора.

Связь между интенсивностью напряжений σ_i и интенсивностью деформаций ε_i принимаем в виде

$$\sigma_i = g(\varepsilon_i)\varepsilon_i. \quad (5)$$

Здесь $g(\varepsilon_i)$ — положительная функция, характерная для рассматриваемого материала.

■ *Разрешающие уравнения.* Для вывода разрешающих уравнений используется вариационное уравнение Лагранжа [11]

$$\delta W - \delta A = 0, \quad (6)$$

где δW — вариация потенциальной энергии деформации оболочки, δA — вариация работ внешних сил, действующих на оболочку.

В каждом из прямоугольников Ω_j области единичного квадрата решение представляется в виде интерполяционного Эрмитового кубического сплайна двух переменных

$$u = \varphi(s^1)F_u \varphi(s^2), \quad v = \varphi(s^1)F_v \varphi(s^2), \quad w = \varphi(s^1)F_w \varphi(s^2), \quad (7)$$

где $\varphi(s^1), \varphi(s^2)$ — векторы координатных функций; F_u, F_v, F_w — матрицы узловых значений компонент перемещений, первых и вторых смешанных производных.

Применение предварительной параметризации и представление решения в каждом из прямоугольников Ω_j в виде кубического сплайна обеспечивают геометрическую неразрывность, а также непрерывность функции перемещений и их первых производных во всей рассматриваемой области Ω , что является важным условием сходимости к точному решению при уменьшении размеров прямоугольников Ω_j . Таким образом, удается получить согласованные элементы на базе гипотезы Кирхгофа — Лява для оболочек сложной геометрии.

Подставляя вариации перемещений и деформаций в вариационные уравнения Лагранжа и учитывая независимость узловых перемещений и их производных, после ряда преобразований получается система алгебраических уравнений

$$[A]\{U\} = \{R\}_p + \{R\}_n. \tag{8}$$

Здесь $[A]$ — симметричная матрица жесткости системы ленточной структуры; $\{U\}$ — вектор неизвестных; $\{R\}_p$ — вектор нагрузки; $\{R\}_n$ — вектор нелинейных составляющих. Решение полученной системы нелинейных алгебраических уравнений отыскиваем методом общей итераций.

Алгоритм отмеченного выше сплайнового варианта метода конечных элементов для расчета НДС оболочечных конструкций сложной геометрии в цилиндрической системе координат реализован программным комплексом SV FEM-2.

■ *Напряженно-деформированное состояние (НДС) металлической части вентиляторной градирни с учетом физической нелинейности.* На базе сплайнового варианта метода конечных элементов (SV FEM-2) [11], развитого для расчета напряженно-деформированного состояния оболочечных конструкций сложной геометрии в цилиндрической системе координат с учетом физической нелинейности, исследуется НДС металлической части вентиляторной градирни (рис. 11).

Информация о подкреплениях задается в каждой расчетной точке в формате: площадь, статический момент и момент инерции сечения ребра. Благодаря наличию плоскости симметрии рассмотрена половина конструкций, которая разделена на 10 элементов по окружной координате (угол θ°) и 23 — по образующей. Нумерация горизонтальных сечений (рис. 11) идет снизу вверх. Нулевой угол соответствует плоскости направления ветра. Распределение давления от ветровой нагрузки, как по высоте, так и по окружной координате, взято в соответствии со строительными нормами и правилами, действующими на территории РФ СП 20.13330.2016².

Актуальные механические характеристики тонкостенных элементов конструкций определены экспериментально-теоретическим методом, описанным выше. Образцы были вырезаны из конструкции градирни, остановленной на капитальный ремонт. Изменение толщин обечайки t по образующей и степень износа горизонтальных ребер W для актуального варианта (для некоторых наиболее изношенных сечений по рис. 11) приведены в таблице.

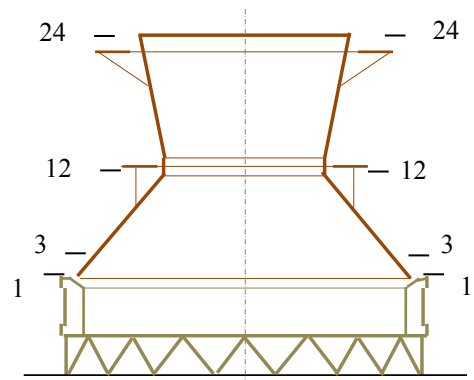


Рис. 11. Схема вентиляторной градирни
Источник: выполнено Н.М. Якуповым.

Изменение толщин обечайки и степень износа горизонтальных ребер

Сечение	1–1	2–2	3–3	4–4	8–8	9–9	10–10	11–11	12–12	13–13	14–14
t, mm	0,35	0,30	0,10	0,00	0,05	0,30	0,35	0,30	0,10	0,05	0,10
$W, \%$	40	30	10	0	5	30	40	30	10	5	10

Источник: выполнено Н.М. Якуповым.

² СП 20.13330.2016. Свод правил «Нагрузки и воздействия». О «НИЦ «Строительство» — ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 2017.

Проанализированы поля перемещений и напряжений для исходного и актуального вариантов конструкций градирни. Выявлены существенные концентрации напряжений в дефектных областях конструкций, образовавшихся в результате коррозионного износа под воздействием вибраций от работающих вентиляторов, высоких температур от охлаждаемой среды, солнечного излучения, а также ветровых, вакуумных и весовые нагрузки. Максимальные значения интенсивностей напряжений σ_i по окружной координате θ° при максимальной нагрузке в линейной постановке для первых двух горизонтальных расчетных сечений (по рис. 11) приведены на рис. 12 (сечение 1–1) и рис. 13 (сечение 2–2).

Как видно из графиков (рис. 12), концентрации напряжений на первом сечении (область опоры конфузора к железобетонной части градирни) наблюдаются в районе $\theta = 36^\circ$ и $\theta = 160^\circ$. На втором сечении (рис. 13) всплеск напряжения наблюдается в зоне $\theta = 63^\circ$. Для актуального варианта линейные напряжения превышают напряжение текучести для данного материала ($\sigma_m = 200$ МПа).

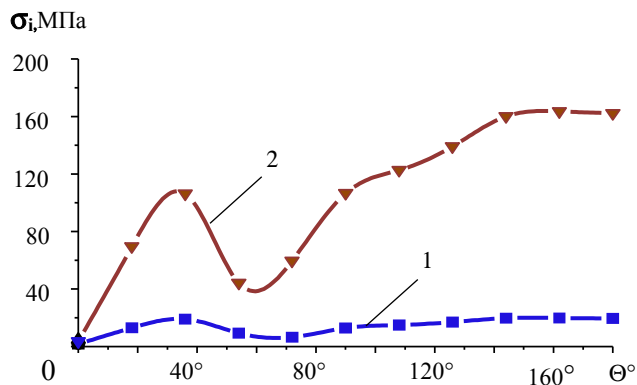


Рис. 12. Зависимость $\sigma_i-\theta^\circ$ для сечения 1–1:
1 — исходная; 2 — фактическая
Источник: выполнено Н.М. Якуповым.

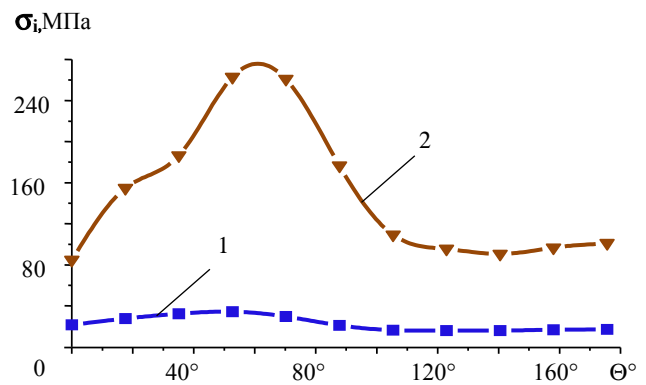


Рис. 13. Зависимость $\sigma_i-\theta^\circ$ для сечения 2–2:
1 — исходная; 2 — фактическая
Источник: выполнено Н.М. Якуповым.

На рис. 14 приведены изменения интенсивности напряжений в зависимости от величины нагрузки для точек D и C , расположенных в сечении 1–1; точка D — на некотором удалении от точки C возникают максимальные напряжения.

Линия F соответствует $\sigma_m = 200$ МПа. Как видно из графиков (рис. 14), при 82 % от максимальной нагрузки в точке C напряжение достигает σ_m и дальше практически не возрастает.

В точке D , начиная с 82 % нагружения, наблюдается, как и следовало ожидать, более интенсивный рост напряжений. То есть происходит перераспределение нагрузок.

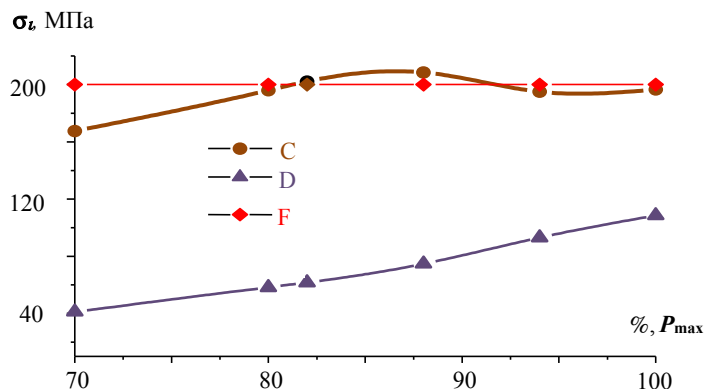


Figure 14. Зависимость σ_i-P для точек D и C , расположенных в сечении 1–1
Источник: выполнено Н.М. Якуповым

Таким образом, развит сплайновый вариант метода конечных элементов в цилиндрической системе координат с учетом пластических деформаций. Выполнены расчеты НДС для исходного и актуального состояния металлической части вентиляторной градирни. Актуальные механические свойства тонкостенных элементов конструкций определены экспериментально-теоретическим методом. Установлено, в частности, что коррозионный износ приводит к существенному росту напряжений, которые могут превышать предел текучести материала. При этом возникающие пластические деформации приводят к перераспределению напряжений.

4. Заключение

По результатам проведенного исследования следует отметить следующее:

1. Описан подход диагностики металлических конструкций на примере крупногабаритной вентиляторной градирни, испытывающих комплексное воздействие вибрации и повышенной температуры.

2. Экспериментально-теоретическим методом исследован коррозионный износ стальных тонкостенных элементов конструкций, испытывающих воздействие вибрации и температуры.

3. Установлено, что наличие вибрации и повышенная температура среды способствуют ускоренному разрушению защитного пассивирующего слоя тонкостенных стальных элементов и тем самым способствуют ускоренной коррозии. При этом с увеличением температуры и времени воздействия вибрации эффект усиливается.

4. Усовершенствован сплайновый вариант метода конечных элементов в цилиндрической системе координат и выполнены расчеты НДС металлической части вентиляторной градирни с учетом пластических деформаций для исходного и актуального состояния металлической части. При расчете актуального состояния были учтены коррозионные дефекты и изменения жесткостных свойств тонкостенных элементов, обусловленных процессом эксплуатации в результате комплексного воздействия вибрации и высоких температур.

5. Установлено, что коррозионный износ приводит к существенному росту напряжений в элементах конструкций, которые могут превышать предел текучести материала, при этом возникающие пластические деформации приводят к перераспределению напряжений.

Полученные результаты имеют важное теоретическое и практическое значение и их необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации металлических конструкций, испытывающих существенные вибрационные нагрузки и работающих при высоких температурах и под воздействием различных излучений.

Для решения проблемы безопасной работы тонкостенных конструкций, подвергающихся коррозионному износу, при диагностике состояния наряду с учетом изменения геометрических параметров, необходимо учитывать изменение механических характеристик от воздействия внешних факторов, в частности от вибрации, температуры среды и физических полей.

Список литературы

1. Yakupov N.M., Nurgaliev A.R., Giniyatullin R.R., Yakupov S.N. Operation of structures with corrosive wear // Russ. Engin. Res. 2013. Vol. 33. P. 69–73. <https://doi.org/10.3103/S1068798X13020202> EDN: RFESWX

2. Frumkin A. Bemerkung zur Theorie der Wasserstoffüberspannung // Zeitschrift für Physikalische Chemie. 1932. Vol. 160. No. 1. С. 116–118.

3. Yang Y., Luo Ya., Sun M., Wang Ju. Effect of magnetic field on corrosion behavior of X52 pipeline steel in simulated soil solution // International Journal of Electrochemical Science. 2021. Vol. 16. No. 10. Article no. 211010. <https://doi.org/10.20964/2021.10.33> EDN: JEJBAE

4. Rocabert U., Parnicki-K.M.A., Maccari F., Tankov N., Ener S. Comprehensive study of τ -phase Mn–Al–C magnets: corrosion resistance, structural integrity, and magnetic properties // ACS Omega. 2024. Vol. 10. No. 1. Available from: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.4c07540> (accessed: 12.06.2025)

5. Ye X., Yang J., Yang W., Chen T., Li W., Liu Y. Theoretical and experimental study on the effect of magnetic field on the amount of steel bars corrosion // Corrosion Science. 2025. Vol. 255. Article no. 113082. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2025.113082>

6. Tang Y.Ch., Davenport A.J. Magnetic field effects on the corrosion of artificial pit electrodes and pits in thin films // J. Electrochem. Soc. 2007. Vol. 154. No. 7. P. 362–370. <https://doi.org/10.1149/1.2736662>

7. Alimi F., Tlili M., Ben Amor M., Maurin G., Gabrielli C. Influence of magnetic field on calcium carbonate precipitation in the presence of foreign ions // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2009. Vol. 45. No. 1. P. 56–62. <https://doi.org/10.3103/S1068375509010104> EDN: LWGKSH

8. *Mushnikov A.N., Povolotskaya A.M., Zadvorkin S.M., Kryucheva K.D.* The influence of biaxial symmetric tension on the magnetic properties of a composite specimen made of two steel plates with different mechanical and magnetic properties // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2024. Vol. 60. P. 9. P. 1015–1027. <https://doi.org/10.1134/S1061830924700773> EDN: ETUOCC
9. *Zhao S., Zhang H., Piao H.-G., Wang Y., Sun X., Zhang Y., Huang Y., Zhao Y.* The effect of magnetic field pretreatment on the corrosion behavior of carbon steel in static seawater // *RSC Adv*. 2020. Vol. 10. P. 2060–2066. <https://doi.org/10.1039/C9RA09079G> EDN: UZVBIB
10. *Dugargaramjav T., Pashka B., Munkhbaatar B.* Study of the influence of electromagnetic fields on the corrosion of district heating pipelines: corrosion of district heating pipelines // *Journal of Energy Transition*. 2024. Vol. 2. No. 1. P. 15–21. <https://doi.org/10.59264/jet.v2i1.54>
11. *Yakupov S.N., Kiyamov H.G., Yakupov N.M., Mukhamedova I.Z.* A new variant of the fem for evaluation the strenght of structures of complex geometry with heterogeneous material structure // *Case Studies in Construction Materials*. 2023. Vol. 19. Article no. e02360. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02360>
12. *Galimov N.K., Yakupov N.M., Yakupov S.N.* Experimental-theoretical method for determining mechanical characteristics of spherical films and membranes of complex structure // *Mechanics of Solids*. 2011. Vol. 46. P. 380–386. <https://doi.org/10.3103/S0025654411030058> EDN: OHZMWJ
13. *Staszak N., Gajewski T., Garbowski T.* Effective stiffness of thin-walled beams with local imperfections // *Materials (Basel)*. 2022. Vol. 15. No. 21. Article no. 7665. <https://doi.org/10.3390/ma15217665> EDN: WGJHOE
14. *Zawada-Michalowska M., Pieško P.* Post-machining deformations of thin-walled elements made of EN AW-2024 T351 aluminum alloy as regards the mechanical properties of the applied, rolled semi-finished products // *Materials (Basel)*. 2021. Vol. 24. Article no. 7591. <https://doi.org/10.3390/ma14247591>
15. *Zhang K., X. Liu X., L. Zhu L.* Prediction reliability improvement on long-term creep life for P91 steel using a hybrid method of artificial neural network and CDM model // *Engineering Fracture Mechanics*. 2025. Vol. 323. Article no. 111172. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2025.111172> DN: EBNVVP
16. *Yu Z.Y., Wang X.M., Cao G.W.* Environmental effects on the creep response of thin-walled Ni-based single crystal superalloys // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2022. Vol. 31. No. 9. P. 7263–7276. <https://doi.org/10.1007/s11665-022-06791-8> EDN: UJXNVZ
17. *Haider Hadi J.* Effect of vibration on the corrosion rate of Mg, Al, and Zn cathodes protection in freshwater and the Arab gulf seawater // *EHEI Journal of Science and Technology*. 2024. Vol. 4. No. 2. P. 56–161. <https://doi.org/10.34874/PRSM.ehei-jst-vol4iss2.55474>
18. *Shao R., Wang H., Lu K., Song Ju.* Effect of excitation vibration on mechanical property and stress corrosion resistance of cast steel // *Journal of Vibroengineering*. 2023. Vol. 25. No. 7. P. 1230–1242. <https://doi.org/10.21595/jve.2023.23125> EDN: VUMQWY
19. *Chen H., Pan P., Wang Yu., Zhao Q.* Field study on the corrosion and ash deposition of low-temperature heating surface in a large-scale coal-fired power plant // *Fuel*. 2017. Vol. 208. P. 149–159. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.06.120>
20. *Serafim F.M.F., Alabi W.O., Oguocha I.N.A., Odeshi A.G., Evitts R., Gerspacher R.J., Ohaeri E.G.* Stress corrosion cracking behavior of selected stainless steels in saturated potash brine solution at different temperatures // *Corrosion Science*. 2021. Vol. 178. Article no. 109025. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.109025> EDN: HENEBY