

УДК 539.3

РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ГРАДИРЕН СК 1200

Н. М. Якупов, Р.Г. Нуруллин, А.Р. Нургалиев, С.Н. Якупов
yzsrr@kfti.knc.ru

Проведен анализ состояния конструкций крупногабаритных градирен, выявлены основные причины износа конструкций. Указаны критические области с точки зрения износа строительных конструкций.

На базе экспериментально-теоретического метода были проведены исследования влияния дефектов в виде поверхностных царапин на механические характеристики нагруженных тонкостенных элементов конструкций, работающих в агрессивной среде.

На базе сплайнового варианта метода конечных элементов выполнен анализ напряженно-деформированного состояния металлической части конструкции градирни. Расчет производится на базе деформационной теории пластичности.

Предложена методика экспертной оценки безопасности конструкций и сооружений, которая продемонстрирована на конкретном примере.

Разработаны устройства для предотвращения разрушения и усиления зданий и сооружений, подверженных существенному коррозионному износу. Получены патенты на изобретения №2326218, №2343256.

Введение

Современные конструкции и сооружения воспринимают большие механические нагрузки и, взаимодействуя с окружающей средой, подвергаются в той или иной степени коррозионному износу. Деформации элементов конструкций при этом активизируют коррозионный процесс.

В процессе коррозионного износа происходит изменение геометрических и механических характеристик. Кроме того, процесс коррозии, как экзотермический процесс, приводит к повышению температуры в среде и появлению зон термических неоднородностей, что является фактором нарушения экологического равновесия. То есть процесс коррозии имеет технический и экологический аспекты.

Защита от коррозионного разрушения элементов конструкций и сооружений, работающих при механических воздействиях, является одной из важнейших задач современной экономики. Грамотная защита позволяет сохранить конструкцию или сооружение от разрушения, то есть предотвратить техногенную катастрофу, а также позволяет решить экологические проблемы.

В работе приводятся некоторые результаты анализа состояния конструкций крупногабаритных градирен СК-1200, отмечаются критические области с точки зрения износа строительных конструкций (рис.1), а также даются рекомендации для восстановления и усиления двух критических областей конструкций *с* и *д* по рис.1. Подходы усиления критических областей *б* и *е* были даны, в частности, в работах [1-7].

Градирня – это устройство для охлаждения воды атмосферным воздухом в системах оборотного водоснабжения промышленных предприятий и в устройствах кондиционирования воздуха. На нефтехимических предприятиях находят широкое применение вентиляторные градирни.

Вентиляторные градирни представляют собой конструкции из железобетона (наклонные стойки, цилиндрическая часть) и стали (конфузор, горловина, диффузор и горизонтальные шпангоуты).

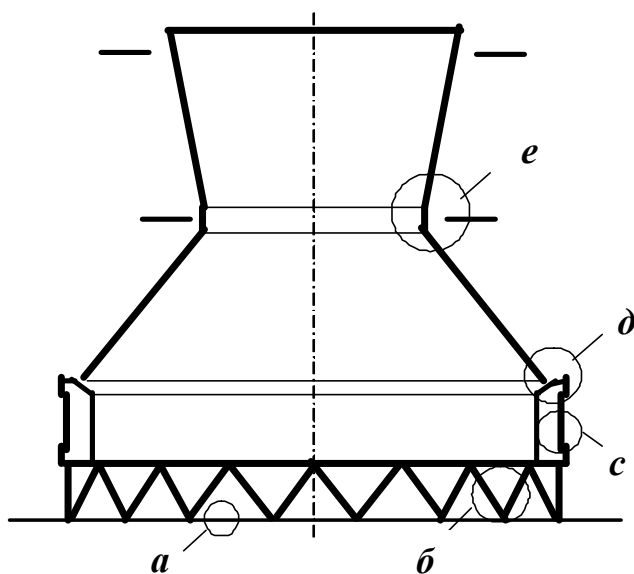


Рис. 1. Критические области конструкций градирни СК - 1200

Они воспринимают силовые нагрузки (вес, нагрузки от ветра и вентилятора) и подвержены интенсивному коррозионному износу (общезаводская атмосфера и охлаждаемая технологическая вода).

Агрессивная среда отрицательно влияет на состояние элементов конструкций, при этом на кинетику коррозионных процессов сильное влияние оказывает уровень напряжений. Коррозионный износ приводит к уменьшению сечения элементов конструкций, снижению механических характеристик материала и соответственно, к увеличению уровня градиента напряжений. Большие нагрузки и влажность, агрессивная среда и перепады температур, а также конструктивные несовершенства приводят к значительному износу строительных конструкций и способствуют их разрушению.

Состояние железобетонных конструкций градирен

Нагрузки в сочетании с агрессивностью среды отрицательно влияют на состояние железобетонных конструкций, происходит процесс разрыхления бетона, возникают микро и макро трещины, появляются очаги коррозии в арматуре. В результате этого снижаются прочностные свойства несущих железобетонных конструкций. Для анализа прочности бетона использовался эталонный молоток Кашкарова.

Натурные обследования состояния строительных конструкций градирен показали, что наклонные стойки и цилиндрическая часть градирни имеют различную степень износа. Критическими областями железобетонных конструкций являются области *б*, *с* и *д* (рис.1). Отдельные элементы в этих областях находятся в аварийном или в неудовлетворительном состоянии.

Состояние металлических конструкций градирен

Агрессивная среда и большая влажность отрицательно влияют на состояние металлических конструкций: нарушается лакокрасочное покрытие, появляются очаги коррозии вплоть до полного «разъедания» некоторых обечаек, ребер и др. Все это приводит к снижению прочности несущих металлических конструкций.

Натурные обследования состояния строительных конструкций градирен показали, что наиболее интенсивному износу подвержены элементы конфузора в области верхнего железобетонного кольца и

элементы конструкций горловины, то есть критическими областями конструкций являются области d и e .

По всему кругу на этих элементах имеются сквозные отверстия и существенные утонения. Поверхности большинства ребер и обечаек покрыты ржавчиной, особенно верхние полки швеллеров. Износу подвержены также элементы фермы, раскосы и элементы (косынки) крепления ферм к панелям.

Основными причинами существенного коррозионного износа являются: нарушение лакокрасочного покрытия, чему способствует агрессивная среда, влажность внутри градирни, знакопеременное деформационное поле и время эксплуатации; наличие различных поверхностных механических дефектов; высокий уровень интенсивности напряжений в некоторых областях конструкций, возникающих от переменных ветровых и больших весовых нагрузок; разгерметизация межпанельных швов; наличие внутреннего воздушного потока с капельножидкими включениями, движущимися с относительно большой скоростью при работающем вентиляторе; несовершенство конструктивно-силовой схемы и нерациональное взаиморасположение соседних градирен, способствующие росту концентраций напряжений, а также накоплению грязи и влаги в отдельных частях конструкции.

Влияние механических дефектов на свойства нагруженных тонкостенных элементов конструкций в агрессивной среде

Особую опасность для нагруженных конструкций представляют случаи, когда имеют место два и более источника разрушения, например, концентраторы напряжений + коррозия. Ниже приведены некоторые результаты исследований влияния дефектов в виде царапин на механические характеристики тонкостенных элементов конструкций, работающих под нагрузкой в агрессивной среде. Аспекты экспериментально-теоретического подхода изложены, в частности, в работах [5-10]. На разработанный способ и установку ДМК-1 получен патент РФ на изобретения [9]. Разработка включена в Отчет РАН за 2006 год [11], а также награжден Серебряной медалью и Дипломом на 35-ом Международном Салоне «Женева-2007» [12].

Были рассмотрены, в частности, образцы толщиной материала $h_0=0,6$ мм и диаметром испытываемой части $D=110$ мм, с дефектами

в виде царапин. Царапины глубиной около 0,02 мм наносились в виде прямоугольной сетки с различными шагами.

Образцы испытывались под давлением 0,2 МПа в течение 888 часов. В качестве агрессивной среды использовался раствор гипохлорит натрия. Вследствие невозможности обеспечения полной герметизации, давление несколько падало, поэтому проводилась регулярная подпитка до 0,2 МПа. Для сопоставления результатов два образца с царапинами подвергались воздействию агрессивной среды, а два других образца с царапинами и один образец без царапин не подвергались коррозионному износу: образец №1 (царапины с шагом 25 мм без агрессивной среды), образец №2 (царапины с шагом 25 мм с агрессивной средой), образец №3 (царапины с шагом 10 мм с агрессивной средой), образец №4 (царапины с шагом 10 мм без агрессивной среды), образец №5 (без дефектов). График изменения прогибов по времени представлен на рис.2.

Были определены модули упругости E образцов в начальный момент испытания (упругая деформация образцов (таблица 1)).

Таблица 1

Модуль упругости	Образец 1	Образец 4	Образец 5
$E, МПа$	149000	133300	200000

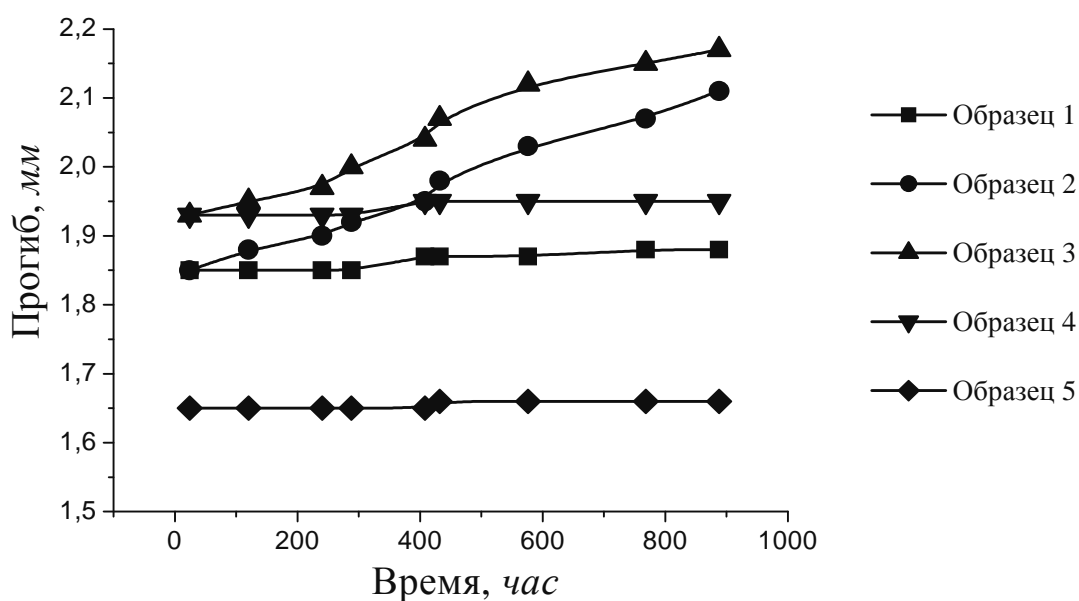


Рис.2. Изменение прогиба по времени

Механические дефекты ускоряют процесс коррозионного износа и влияют на механические характеристики материала. Для мембраны с дефектами условный модуль упругости в конце испытания составил для сетки с шагом 25 мм – 26836 МПа, а для сетки с шагом 10 мм – 24249 МПа.

Анализ напряженно-деформированного состояния

Для анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) металлической части конструкции крупногабаритной градирни использован сплайновый вариант метода конечных элементов [13-17], основанный на синтезе идеи предварительной параметризации срединной поверхности оболочки и метода конечных элементов. Геометрические параметры конструкции задаются в цилиндрической системе координат. Пластические деформации учитываются по деформационной теории пластичности.

Проведены расчеты по определению НДС системы диффузор - горловина - конфузор исходной (до износа) и реальной конструкции (с учетом износа элементов) градирни, находящейся под воздействием собственного веса и ветровой нагрузки. Изменение интенсивности напряжений σ_i по круговой координате θ в районе стыка горловины с диффузором (горизонтальное сечение) представлено на рис.3.

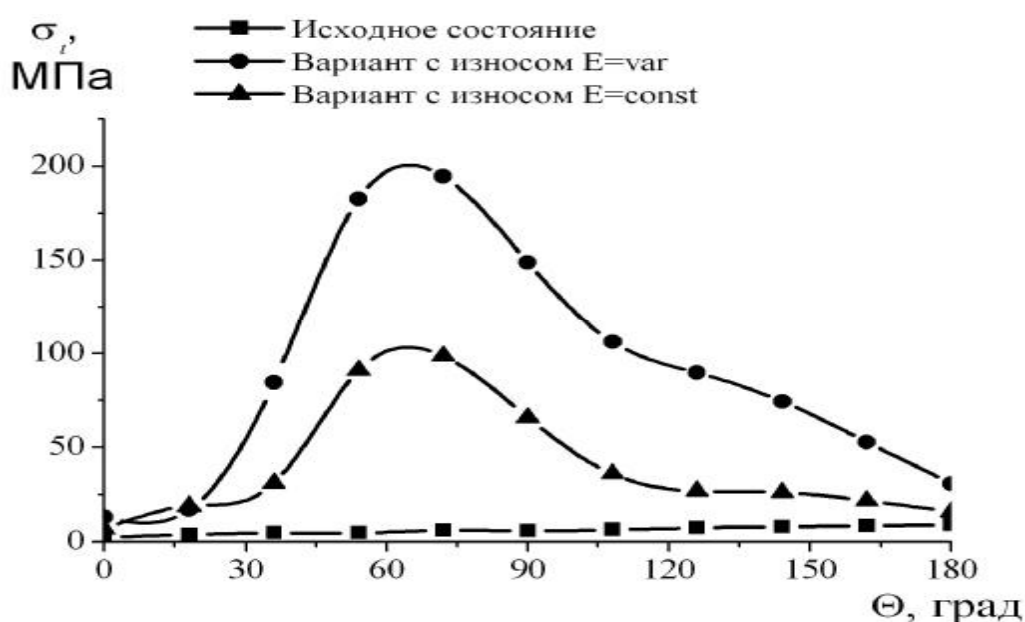


Рис.3. Изменение интенсивности напряжений σ_i от θ

Анализ полученных результатов расчета НДС показывает, что изменение модуля упругости в некоторых областях конструкции может приводить к значительному увеличению интенсивности напряжений, а повышение напряжений способствует снижению несущей способности конструкций и дальнейшему увеличению коррозии в этой области.

Экспертная оценка безопасности конструкций, сооружений

В процессе эксплуатации конструкций и сооружений, в частности градирен, требуется оценка их безопасности в режиме постоянного мониторинга. При этом возникает необходимость получения по определенным критериям не только качественные, но и количественные характеристики безопасности. Это позволило бы определить:

- степень изношенности конструкций и сооружений;
- очередность объектов, требующих выполнения капитального и текущего ремонта;
- целесообразность дальнейшей эксплуатации рассматриваемого объекта и т.д.

Характеристики безопасности можно определить, в частности, путем проведения экспертной оценки.

Экспертную оценку безопасности конструкций и сооружений можно выполнить, используя безразмерные коэффициенты безопасности k_i , значения которых должны находиться в пределах $0 \leq k_i \leq 1$. Коэффициент безопасности представляет собой отношение одноименных (значимых) показателей, играющих основную роль в обеспечении безопасного функционирования объектов:

$$k_i = \frac{S_i}{S_0} \quad (1)$$

где S_i – текущее (фактическое) значение показателя; S_0 – приемлемое с точки зрения обеспечения полной безопасности (нормативное) значение показателя. При этом принимается $S_i \leq S_0$.

При отсутствии регламентов по выбору значений значимых показателей при расчете коэффициента безопасности берутся экстремальные значения показателей:

$$k_i = \frac{S_{\min}}{S_{\max}} \quad (2)$$

Коэффициент безопасности может быть оценен также по степени износа элементов системы, при этом, чем выше степень износа, тем меньше k_i . В частности, в качестве интегральных коэффициентов безопасности наклонных стоек градирен по степени их износа приняты величины, представленные в таблице 2. Степень износа элементов определяется на стадии обследования и, при необходимости, после предварительных расчетов напряженно-деформированного состояния.

Таблица 2

Степень износа элемента	Значение интегрального коэффициента безопасности элемента
Не выше I	1,00
II	0,75
III	0,50
IV	0,25
Стойка полностью разрушена	0,00

Было проведено обследование ряда градирен и выполнены экспертные оценки. В частности, результаты экспертной оценки опорной части градирен В8-2А1 и В9-1А3 приводятся в таблице 3.

Таблица 3

Показатели безопасности	Градирня В8-2А1	Градирня В9-1А3
$\sum_{i=1}^{42} k_{oi}$	28,00	16,75
$k_o = \left(\sum_{i=1}^{42} k_{oi} \right) / 42$	0,67	0,40

Как видно из таблицы 2, оценочная безопасность опорной части градирни В9-1А3 намного (в 1,675 раза) ниже оценочной безопасности опорной части градирни В8-2А1. По этим объективным данным нетрудно оценить степень изношенности опорной части градирни и легко установить очередность восстановления градирен, требующих выполнения капитального и текущего ремонта.

Некоторые рекомендации по усилению конструкций

Были разработаны устройства для усиления и предотвращения разрушения, ослабленных и дефектных участков зданий и сооружений круглой формы в плане, в частности, крупногабаритных вентиляторных градирен.

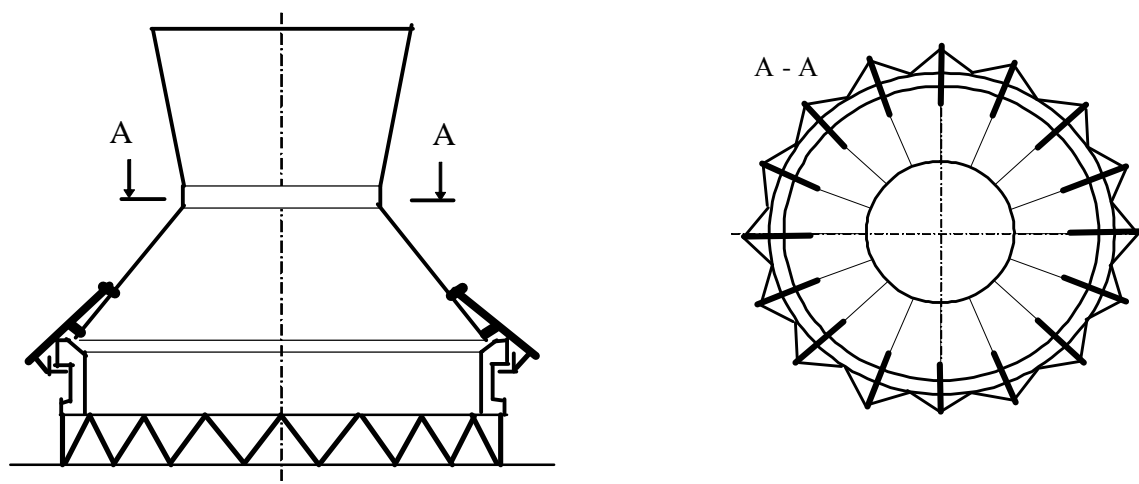


Рис.4. Схема усиления вентиляторной градирни СК-1200 в области опоры конфузора на верхнее железобетонное кольцо

На разработки получены патенты на изобретение РФ [18-20]. Схема усиления градирни СК-1200 в области опоры конфузора на верхнее железобетонное кольцо (рис.4) включает наклонные балки, расположенные в радиальных направлениях конфузора и прикрепленные верхними концами к несущим элементам конструкции и опирающиеся на опорное кольцо [18]. В варианте по [19] устройство по [18] включает также опоясывающий бандаж, стягивающий верхнее железобетонное кольцо градирни.

Схема усиления градирни СК-1200 в цилиндрической области железобетонной части конструкции (рис.5) включает каркас усиления в виде вертикальных стоек, соединенных горизонтальными поясами

жесткости, и раскосы [20]. При этом ячейки образуемой решетки могут быть выполнены разной структуры.

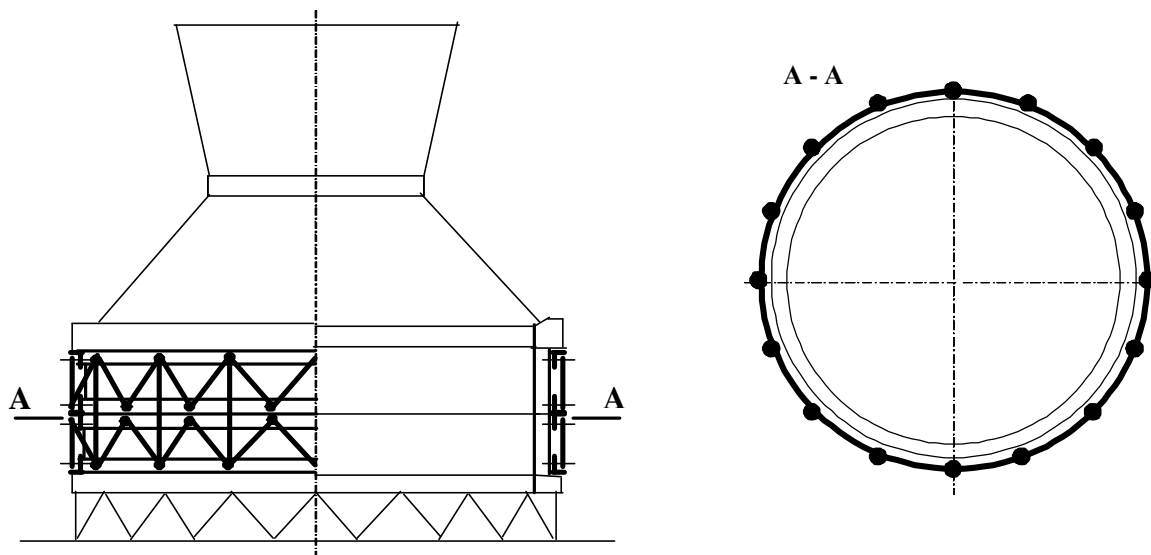


Рис.5. Схема усиления градирни СК-1200 в цилиндрической области железобетонной части конструкции

Заключение

1. Особую опасность для нагруженных конструкций представляют случаи, когда имеют место два и более источника разрушения, например, концентраторы напряжений + коррозия.

2. Дефекты ускоряют коррозионный износ и влияют на механические характеристики материала.

3. Максимальные напряжения наблюдаются в области крепления металлической части к железобетонной части и в районе горловины; в зонах утонений и вблизи отверстий возникают пластические деформации.

4. После 15 – 20 лет эксплуатации градирен требуется проведение капитального ремонта.

5. Разработаны устройства усиления зданий и сооружений [18-20], обеспечивающих рациональную передачу усилий на опоры и позволяющие увеличить долговечность и сейсмостойкость, а также предотвратить разрушение находящиеся в эксплуатации зданий и сооружений, в том числе градирен СК 1200.

6. Разработка «Устройства для усиления зданий и сооружений» награждена Серебряной медалью 12 Московского Международного

Салона промышленной собственности «Архимед» (2009 г., Москва, КВЦ «Сокольники»).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Якупов Н.М., Нуруллин Р.Г., Галявиев Ш.Ш., Киреев Ю.А., Якимов Е.В., Нургалиев А.Р.* Башенная вентиляторная градирня // Патент РФ №2186182. 2002.
2. *Якупов Н.М., Нуруллин Р.Г., Галявиев Ш.Ш., Киреев Ю.А., Якимов Е.В., Нургалиев А.Р.* Опорная система для усиления промышленных зданий // Патент РФ №2196209. 2003.
3. *Якупов Н.М., Нуруллин Р.Г., Нургалиев А.Р.* О состоянии строительных конструкций градирен СК-1200 и способах их усиления // Актуальные проблемы механики сплошной среды. ИММ КазНЦ РАН. Казань: Казанский государственный университет, 2004. С.119-128.
4. *Якупов Н.М., Галявиев Ш.Ш., Нургалиев А.Р., Якупов С.Н.* Состояние конструкций градирен и предотвращение их разрушения // Проблемы энергетики, 2006. № 7-8. С. 36-42.
5. *Якупов Н.М.* Лаборатория нелинейной механики оболочек: история и разработки последних лет. ИММ КазНЦ РАН. Казань: Казанский государственный университет, 2006. 98с.
6. *Якупов Н.М., Нургалиев А.Р., Нуруллин Р.Г., Якупов С.Н.* Предотвращение разрушения строительных конструкций крупногабаритной градирни СК-1200 // IX Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике. Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2006. С.160-161.
7. *Якупов Н.М.* Механика: проблема – идея – практика. Казань: Казан. гос. ун-т, 2010. 161 с.
8. *Низамов Х.Н., Сидоренко С.Н., Якупов Н.М.* Прогнозирование и предупреждение коррозионного разрушения конструкций. М., Издательство РУДН, 2006. 355 с.
9. *Якупов Н.М., Нуруллин Р.Г., Нургалиев А.Р., Якупов С.Н.* Способ испытаний образцов металлических мембран под напряжением и устройство для его осуществления // Патент РФ №2296976. 2007.
10. *Нургалиев А.Р., Якупов Н.М.* Исследование механических характеристик тонкостенных элементов конструкций, подверженных коррозионному износу и находящихся под

- воздействием нагрузки // Актуальные проблемы механики сплошной среды. К 15-летию ИММ КазНЦ РАН. 2006. С.244-254.
11. Отчет о деятельности Российской академии наук в 2006 году. Основные результаты в области естественных, технических, гуманитарных и общественных наук. Механика. М.: Наука, 2007. С.62.
 12. *Jakupov Nuch et alea – Russie* Determination des caracteristiques mecaniques des membranes et des films defectueux et leur utilisation // 35 Salon international des inventions, des techniques et produits nouveaux de Geneve, 2007. P.99, 101.
 13. *Якупов Н.М.* Об одном методе расчета оболочек сложной геометрии // Исследования по теории оболочек. Труды семинара. Вып.17. Ч.2. Казань. Казанск. физ-техн. ин-т КФАН СССР. 1984. С.4-17.
 14. *Корнишин М.С., Якупов Н.М.* Сплайновый вариант метода конечных элементов для расчета оболочек сложной геометрии // Прикладная механика. 1987. Т.23, № 3. С.38-44.
 15. *Корнишин М.С., Якупов Н.М.* К расчету оболочек сложной геометрии в цилиндрических координатах на основе сплайнового варианта МКЭ // Прикладная механика. 1989. Т.25, № 8. С.53-60.
 16. *Якупов Н.М., Серазутдинов М.Н.* Расчет упругих тонкостенных конструкций сложной геометрии. ИММ КазНЦ РАН. Казань. 1993. 206 с.
 17. *Якупов Н.М.* Прикладные задачи механики упругих тонкостенных конструкций. Казань: ИММ КНЦ РАН, 1994. 124 с.
 18. *Якупов Н.М., Нуруллин Р.Г., Галявиев Ш.Ш., Киреев Ю.А., Якимов Е.В., Якупов С.Н.* Устройство для усиления конструкции градирни // Патент РФ №2239033, 2004.
 19. *Якупов Н.М., Нуруллин Р.Г., Якупов С.Н., Галявиев Ш.Ш., Киреев Ю.А., Якимов Е.В.* Устройство для усиления конструкции градирни // Патент РФ №2326218, 2008.
 20. *Якупов Н.М., Нуруллин Р.Г., Галявиев Ш.Ш., Киреев Ю.А., Якимов Е.В., Якупов С.Н.* Устройство для усиления зданий и сооружений // Патент РФ №2343256, 2009.