ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТОНКИХ ОБОЛОЧЕК МАГНИТНЫМ МЕТОДОМ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВНУТРЕННЕГО ДАВЛЕНИЯ И ИМИТАЦИИ ВЕТРОВЫХ НАГРУЗОК (ЧАСТЬ II)

STUDYING OF THIN SHELLS STRESS-STRAIN STATE BY MAGNETIC METHOD UNDER INNER PRESSURE INFLUENCE AND WIND LOADS SIMULATION (PART II)

Р.Б. Тукаева**Rimma B. Tukaeva**

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

Р.Р. Амирова**Roksana R. Amirova**

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

И.Р. Кузеев**Iskander R. Kuzeev**

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

Статья посвящена изучению напряженно-деформированного состояния (НДС) колонного аппарата при воздействии внутреннего избыточного давления и ветровой нагрузки и является продолжением исследований, опубликованных в [1]. Существующие методы расчетов на прочность основаны на упрощенном представлении колонного аппарата и не позволяют получить комплексную картину его реального напряженно-деформированного состояния с учетом остаточных напряжений и геометрических особенностей, которые могут отличаться существенной неоднородностью.

На первом этапе нами был произведен теоретический анализ распределения и соотношения напряжений, возникающих в цилиндрическом корпусе колонного аппарата от внутреннего давления и изгибающих сил от ветровых нагрузок в различных расчетных сечениях; а также разработан лабораторный стенд с моделью колонного аппарата для проведения экспериментальных исследований. Рассматривается понятие «эффективные напряжения», поскольку методы оценки напряжений с применением физических полей не различают остаточные напряжения, которые суммируются с напряжениями, возникающими при внешних воздействиях. Остаточные напряжения носят локальный характер и их практически невозможно предсказать. С использованием прибора ИН-01м для измерения остаточной намагниченности осуществлены экспериментальные исследования НДС колонного аппарата и произведено сравнение опытных значений напряжений с теоретическими. Показано, что если измерения произведены в зонах, где остаточные напряжения малы, то наблюдается удовлетворительное совпадение теоретических и опытных величин механических напряжений. Установлено, что эффективные напряжения практически совпадают с эквивалентными напряжениями, определенными по четвертой теории предельного состояния. Расхождение эквивалентных и эффективных напряжений составляет 10–12 % для плоского напряженного состояния.

Ключевые слова

напряженно-деформированное
состояние, остаточная
намагниченность,
ветровая нагрузка,
внутреннее давление,
эффективные напряжения,
эквивалентные напряжения

The article concentrates on studying of vertical vessel stress-strain state (SSS) under inner excessive pressure and wind load influence and is the continuation of studies published in [1]. Existing methods of strength calculations are based on simplified representation of vertical vessel and do not allow obtaining complex representation of its real stress-strain state taking into account residual stresses and geometrical features which could be significantly irregular.

At the first stage it was carried out theoretical analysis of distribution and ratio of stresses generated in cylindrical body of the vertical vessel in the result of inner pressure and bending forces of wind loads in different design sections. Laboratory stand with model of vertical vessel designed for carrying out experimental studies was developed. The concept «effective stresses» is considered because methods of stresses assessment by means of physical fields do not detect residual stresses which are summed up with stresses generated due to external influences. Residual stresses are local and it is almost impossible to predict them theoretically. Using device ИН-01м for remaining magnetization measurement there were carried out experimental studies of vertical vessel SSS and performed comparison of measured stresses with theoretical ones. It was demonstrated that when measurements are performed in zones where residual stresses are insignificant, we obtain good agreement between theoretical and measured values of mechanical stresses. It was found out that effective stresses are almost equal to stresses determined by the fourth limit state theory. Difference between equivalent and effective stresses for plane stress state amounts to 10–12 %.

Авторами спроектирована и изготовлена лабораторная установка, которая имитирует деформирование колонного аппарата, работающего под внутренним давлением, от действия статической составляющей ветровой нагрузки. На следующем этапе исследований поставлена цель сравнения расчетных и экспериментальных значений возникающих напряжений в различных сечениях колонного аппарата.

Анализ способов оценки напряженного состояния в стальных конструкциях [2–6] позволил остановиться на магнитных методах и использовать для этих целей прибор ИН-01м [7]. Измерение механических напряжений этим прибором осуществляется магнитным контролем напряженно-деформированного состояния (НДС) металла по структурно-чувствительным магнитным параметрам металла, в данном случае по остаточной намагниченности.

Разработчики прибора различают такие понятия, как:

- остаточная намагниченность (ОНМ);
- поле остаточной намагниченности (ПОН).

При этом установлено, что зависимость ОНМ и ПОН от величины механического напряжения по характеру может быть различной. Это необходимо учитывать при исследовании НДС объекта.

Key words

stress-strain state,
remaining magnetization,
wind load, inner pressure,
effective stresses,
equivalent stresses

Для достижения конечной цели измерения необходимо производить для двух состояний изделия:

— деформированного состояния, в этом случае начальное магнитное состояние (остаточная намагниченность металла J_r) создается под воздействием внешней нагрузки ($J_r \neq 0$, механическое напряжение $\sigma \neq 0$);

— недеформированного состояния, когда нагрузка отсутствует и начальное магнитное состояние создается без внешнего механического напряжения ($J_r \neq 0$, $\sigma = 0$).

Кроме этого, анализ формул, заложенных в основу данного метода, показал, что теоретические зависимости различны для одноосного (линейного) и двухосного (плоского) напряженных состояний.

Основные зависимости, используемые в методике измерений [5, 6] для деформированного и недеформируемого изделий при одноосном и двухосном напряженных состояниях, систематизированы и приведены в таблице 1.

В работе [8] рассматривается методика измерения НДС изделия с использованием понятия согласованного и несогласованного изменений напряжений для плоского напряженного состояния. Согласованным изменением напряжений считается случай, когда характер связи напряжений друг с другом не изменяется (постоянен) при изменении нагрузки или сочетании нагрузок. Например, такая законо-

Таблица 1. Основные зависимости, заложенные в основу метода магнитного контроля НДС металла [5, 6]

Параметры	Недеформируемое стальное изделие ($J_r \neq 0, \sigma = 0$)	Деформированное стальное изделие ($J_r \neq 0, \sigma \neq 0$)
Остаточная намагниченность металла J_r	$J_r(\sigma\sigma) = \frac{J_{r0}}{1 + \frac{\lambda_s H_{r0}}{\mu_0 T F_z H_{c0} J_s^2} \sigma}$	$J_r(\sigma) = J_{r0} + \frac{\lambda_s J_{r0}}{\mu_0 J_s^2 N} \sigma$
Условные обозначения	TF (x, y, z, a, b) — топографическая функция от координат и линейных размеров остаточной намагниченной области металла; J_{r0} — остаточная намагниченность металла при отсутствии механических напряжений; λ_s — магнитострикция насыщения; J_s — намагниченность насыщения металла; σ — механическое напряжение; μ_0 — магнитная постоянная	
Напряженность поля остаточной намагниченности при одноосном напряженном состоянии H_r	$H_r(\sigma\sigma) = \frac{H_{r0}}{1 + \frac{\lambda_s H_{r0}}{\mu_0 T F_z H_{c0} J_s^2} \sigma}$	$H_r(\sigma\sigma) = H_{r0} + \frac{\lambda_s H_{r0}}{\mu_0 J_s^2 N} \sigma,$ где $H_{r0} = H_r(\sigma = 0)$
Напряженность поля остаточной намагниченности при двухосном (плоском) напряженном состоянии H_r	$H_r(\sigma_x, \sigma_y) = \frac{H_{r0}}{1 + \frac{\lambda_s H_{r0}}{\mu_0 T F_z H_{c0} J_s^2} \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - 2\eta \sigma_x \sigma_y}}$	$H_r(\sigma_x, \sigma_y) = H_{r0} + \frac{\lambda_s H_{r0}}{\mu_0 J_s^2 N} \sigma_{эф} =$ $= H_{r0} \left(1 + \frac{\lambda_s}{\mu_0 J_s^2 N} \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - 2\eta \sigma_x \sigma_y} \right)$
Эффективное напряжение $\sigma_{эф}$	$\sigma_{эф} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - 2\eta \sigma_x \sigma_y}$	
Условные обозначения	$H_{r0} = H_r(\sigma = 0)$; σ_x, σ_y — главные механические напряжения металла, соответственно кольцевые и меридиональные; η — коэффициент Пуассона; λ_s — магнитострикция насыщения металла; J_s — намагниченность насыщения металла; N — размагничивающий фактор остаточной намагниченности участка металла	

мерность характерна для тонкостенных: сферической ($\sigma_x = \sigma_y$), цилиндрической и конической оболочек ($\sigma_x = \sigma_y/2$) при воздействии внутреннего давления. Несогласованный характер изменения напряжений наблюдается, когда нет определенной зависимости изменения обоих напряжений при воздействии нагрузки, т. е. когда $m = \sigma_y/\sigma_x \neq \text{const}$. Этот случай может наблюдаться при воздействии на колонный аппарат внутреннего давления и изгибающего момента.

На модели цилиндрического аппарата проведены эксперименты по оценке НДС. Результаты сканирования магнитных характеристик показаны на рисунке 1.

По результатам сканирования сосуда можно сделать следующие выводы:

— первоначальное распределение НДС металла является неравномерным. На нижнем сварном шве имеется концентратор напряжений (светло-серая область на диаграмме, снятой при $P = 0$);

— при увеличении давления указанная область увеличивается в размерах, распределение НДС металла остается неравномерным, при этом средний уровень измеряемых величин растет;

— наиболее равномерное и линейное изменение НДС металла происходит в средней части сосуда, наиболее удаленной от сварных швов.

Для плоского напряженного состояния, как показано в таблице 1, напряженность поля остаточной напряженности является функцией так называемого эффективного напряжения, которое определяется по формуле

$$\sigma_{эф} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - 2\mu \sigma_x \sigma_y}, \quad (1)$$

где $\sigma_x = \sigma_t$ — кольцевое напряжение, МПа;
 $\sigma_y = \sigma_m$ — меридиональное напряжение, МПа.

В случае двухосного НДС, подставляя в уравнение (1) зависимость $\sigma_y = \sigma_x/2$, которая справедлива для тонкостенной цилиндрической оболочки, а также учитывая, что для стали $\mu = 0,3$, получили

$$\begin{aligned} \sigma_{эф} &= \sqrt{(\sigma_x)^2 + \left(\frac{\sigma_x}{2}\right)^2 - 2 \cdot 0,3 \sigma_x \frac{\sigma_x}{2}} = \\ &= \sqrt{\sigma_x^2 + (0,5\sigma_x)^2 - 0,3\sigma_x^2} = \sqrt{\sigma_x^2 + 0,25\sigma_x^2 - 0,3\sigma_x^2} = \\ &= \sqrt{\sigma_x^2 - 0,05\sigma_x^2} = \sqrt{0,95\sigma_x^2} \approx 0,97\sigma_x. \end{aligned} \quad (2)$$

а) при $P = 0$; б) при $P = 5$ МПа

Рисунок 1. Результаты сканирования сосуда

Эффективное напряжение для цилиндрической обечайки в двухосном напряженном состоянии практически равно окружному напряжению $\sigma_{эф} = \sigma_x$. Это означает, что при проведении измерений прибором ИН-01м по значениям напряженности поля остаточной намагниченности определяются окружные напряжения $\sigma_x = \sigma_t$.

В этом случае экспериментальные значения меридиональных напряжений могут быть найдены расчетным путем, т. е. $\sigma_m = \sigma_t/2$; ($\sigma_y = \sigma_x/2$).

Аналогичные исследования проведены с использованием четвертой теории предельного состояния.

В этом случае эквивалентные напряжения определяются по формуле (3). Произведя аналогичные преобразования, как для формулы (1), получили следующий результат:

$$\begin{aligned}\sigma_{эКВ} &= \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y}; \rightarrow \left| \sigma_y = \frac{\sigma_x}{2} \right|; \\ \sigma_{эКВ} &= \sqrt{(\sigma_x)^2 + \left(\frac{\sigma_x}{2}\right)^2 - \sigma_x \frac{\sigma_x}{2}} = \\ &= \sqrt{\sigma_x^2 + (0,5\sigma_x)^2 - 0,5\sigma_x^2} = \sqrt{\sigma_x^2 + 0,25\sigma_x^2 - 0,5\sigma_x^2} = \\ &= \sqrt{\sigma_x^2 - 0,25\sigma_x^2} = \sqrt{0,75\sigma_x^2} \approx 0,87\sigma_x. \quad (3)\end{aligned}$$

То есть, зависимость эквивалентных напряжений от кольцевых имеет вид:

$$\sigma_{эКВ} = 0,87\sigma_x. \quad (4)$$

Используя результаты расчетов, провели первую серию экспериментов, нагружая физическую модель колонного аппарата

внутренним давлением. Определяли разность ΔH_r при давлении $P = 0$ и создаваемом P_i , далее сравнивали эти значения с теоретическими, определяли тарировочный коэффициент для перевода напряженности поля остаточной намагниченности (НПОН) в

напряжения. Экспериментальные значения НПОН колонного аппарата для разных расчетных сечений (рисунок 2) показаны в таблице 2. Сечения В-В и Г-Г в данной работе совместили ввиду незначительной разности расстояний

Рисунок 2. Расчетные сечения колонного аппарата

Таблица 2. Экспериментальные значения напряженности поля остаточной намагниченности колонного аппарата, мТл

Сечения КА	Внутреннее давление Р, МПа										
	0	3		5		7		9		11	
	H _г	H _{г1}	ΔH _{г1}	H _{г2}	ΔH _{г2}	H _{г3}	ΔH _{г3}	H _{г4}	ΔH _{г4}	H _{г5}	ΔH _{г5}
Б–Б	1,98	2,03	0,05	2,07	0,09	2,11	0,13	2,16	0,18	2,18	0,20
Г–Г	2,05	2,08	0,03	2,15	0,10	2,19	0,14	2,20	0,15	2,23	0,18
Д–Д	2,31	2,17	–0,14	2,16	–0,15	2,15	–0,14	2,16	–0,15	–	–
Е–Е	1,77	1,80	0,03	1,86	0,09	2,13	0,36	2,12	0,35	–	–

Рисунок 3. Зависимость НПОН от внутреннего давления для сечения Б-Б

яний от опорной поверхности до рассматриваемого сечения $x0Г-Г$ и $x0В-В$.

В таблице 2 значения ΔH_{r1} , ΔH_{r2} и т. д. получаются путем вычитания НПОИ при давлении $P = 0$ и, например, при давлении $P = 3$ МПа, 5 МПа и т. д.

Анализ значений, приведенных в таблице 2, показывает, что для сечений Д-Д и Е-Е, которые относятся к опорной обечайке и в которых не должны возникать напряжения при воздействии внутреннего давления, существуют какие-то остаточные напряжения, изменения которых носят сложный характер.

Как показало предварительное сканирование колонного аппарата (рисунок 1), остаточные напряжения весьма малы в сечении Б-Б, в котором в дальнейшем и проводили экспериментальные исследования.

Зависимость изменения НПОИ (ΔH_r) от внутреннего давления для сечения Б-Б приведена на рисунке 3.

Наблюдается линейное увеличение напряженности с ростом P , что хорошо согласуется с теорией и описанием прибора ИН-01м.

По значениям напряженности определяли величины окружных механических напряжений, а затем, учитывая, что $\sigma_y = \sigma_x/2$, рассчитывали меридиональные напряжения. При обработке данных и сравнении величин ΔH_r с теоретическими получили коэффициент для перевода напряженности поля оста-

точной намагниченности в кольцевые напряжения $K = 800$.

Полученные экспериментальные значения кольцевых напряжений приведены в таблице 3. В этой же таблице представлены теоретические значения напряжений, рассчитанные по формуле для кольцевых напряжений для цилиндрической оболочки.

Зависимость механического кольцевого напряжения от внутреннего давления показана на рисунке 4.

Из рисунка 4 видно, что теоретические и экспериментальные значения близки друг другу. Отклонение составляет не более 5 %, что вполне допустимо и находится в пределах ошибки опыта.

Далее проводили экспериментальное определение напряжений от ветровых нагрузок, реализуя расчетную схему, представленную на рисунке 5.

При воздействии ветровых нагрузок возникают изгибающие моменты, от которых в сосудах действуют изгибные напряжения. При этом, как было сказано ранее, возникают только меридиональные напряжения, а окружные равны нулю. Таким образом, в этом случае наблюдается одноосное (линейное) напряженное состояние (это напряженное состояние не совсем линейное, так как соседние волокна действуют друг на друга и в таком случае применяют «эффективный» модуль

Таблица 3. Теоретические и экспериментальные значения кольцевых напряжений для сечения Б-Б корпуса колонного аппарата

Напряжения	Давление P , МПа				
	3	5	7	9	11
Теоретические значения σ_x (σ_t), МПа	43	71,7	100,31	129	157,6
Экспериментальные значения σ_x , МПа	40	72	104	144	160

Рисунок 4. Зависимость кольцевого напряжения от внутреннего давления

Рисунок 5. Расчетная схема аппарата

упругости, который связывает модуль Юнга и коэффициент Пуассона).

Значения статической ветровой нагрузки, как было рассчитано ранее, принимали равными $P_1 = 11,38$ Н; $P_2 = 9,79$ Н; $P_3 = 6,92$ Н. Однако при этих нагрузках получаются малые значения напряжений, которые не улавливаются прибором.

Поэтому было решено в экспериментах увеличить нагрузки и принять их равными $P_1 = 114$ Н; $P_2 = 98$ Н; $P_3 = 69$ Н.

Далее определяли теоретические значения изгибающих моментов и напряжений от указанных нагрузок и сравнивали с напряжениями, определенными экспериментально (таблица 4). Коэффициент $K = 400$.

Анализ результатов показывает, что наблюдается большое расхождение расчетных и экспериментальных значений напряжений. Это можно объяснить тем, что, во-первых, сказывается влияние остаточных напряжений, особенно в зоне, близкой к сварным швам и, во-вторых, чувствительность прибора недо-

статочно, чтобы улавливать небольшие изменения напряжений.

Далее применение расчетно-экспериментального метода определения напряжений позволило оценить НДС конструкции при совместном действии внутреннего давления и изгибающего момента, имитирующего действие ветровой нагрузки.

Экспериментальному определению остаточной намагниченности в зависимости от давления при постоянном изгибающем моменте предшествовал теоретический расчет напряжений при постоянной ветровой нагрузке и изменяющемся внутреннем давлении.

В таблице 5 систематизированы данные о напряженном состоянии, эффективных и эквивалентных напряжениях для различных элементов и поперечных сечений КА в зависимости от прикладываемых нагрузок.

Анализ данных, приведенных в таблице 5, показывает, что:

— эффективные напряжения на наветренной и подветренной сторонах практически одинаковы (расхождение от 1 % до 3 %),

Таблица 4. Расчетные и экспериментальные значения меридиональных напряжений, возникающих от ветровых нагрузок

Сечение	H_{r0} при $M = 0$	H_{r1}	ΔH_r	$\sigma_m^{\text{экспер}}$, МПа	$\sigma_m^{\text{теор}}$, МПа	%
Б-Б	1,71	1,72	0,01	4	5,6	28
Г-Г	1,77	1,78	0,01	4	5,9	32
Д-Д	1,86	1,88	0,02	8	6,8	15
Е-Е	1,82	1,87	0,05	20	10,7	50

т. е. в этом случае при экспериментальном определении напряжений НПОН должна быть практически одинакова на наветренной и подветренной сторонах;

— эффективные напряжения на наветренной и подветренной сторонах с точностью до 3 % адекватны тангенциальным напряжениям σ_x (σ_t), действующим от внутреннего давления. Это говорит о том, что значения НПОН, определенные только при воздействии давления, и НПОН, определенные при совместном воздействии давления и изгибающего момента, должны быть практически одинаковы, как это показано на рисунке 4;

— расхождение эквивалентных и эффективных напряжений составляет 0 % — для линейного НДС и от 10 % до 12 % — для плоского напряженного состояния.

На рисунке 6 приведены результаты числовых значений напряжений, рассчитанных для сечения Г-Г по формулам, представленным в таблице 5.

Экспериментальные значения напряжений от совместного воздействия ветровых нагрузок и давления определяли только для сечения Б-Б, где, как показало сканирование, действуют наименьшие остаточные напряжения (таблица 6).

Рисунок 6. Теоретические значения эффективного и эквивалентного напряжения от давления для сечения Г-Г (при совместном воздействии давления и ветровых нагрузок)

Таблица 5. Напряженное состояние, эффективные и эквивалентные напряжения для различных элементов и поперечных сечений КА в зависимости от прикладываемых нагрузок

Элемент КА	Поперечное сечение	Приложенные нагрузки	Напряженное состояние	Напряжения		$m = \sigma_y / \sigma_x$	$\sigma_{эф}$		$\sigma_{экв}$	Расхождение $\sigma_{экв}$ и $\sigma_{эф}$, %
				σ_x (σ_t)	σ_y (σ_m)					
Корпус	Б-Б Г-Г	P (давление)	Плоское	$\sigma_t \neq 0$	$\sigma_m \neq 0$	$m = \text{const}$, согласованное изменение	$\sigma_{эф} = 0,97\sigma_t$		$\sigma_{экв} = 0,87\sigma_t$	11,5
Корпус, колонный аппарат	Б-Б Г-Г Д-Д Е-Е	$M_{изг}$ от ветровых нагрузок	Линейное	$\sigma_t = 0$	$\sigma_m \neq 0$	$m = 0$	$\sigma_{эф} = \sigma_m$		$\sigma_{экв} = \sigma_m$	0
Корпус	Б-Б Г-Г	P (давление); $M_{изг}$ от ветровых нагрузок	Плоское	$\sigma_t \neq 0$	$\sigma_m \neq 0$	$m = \sigma_y / \sigma_x \neq \text{const}$, несогласованное изменение	$\sigma_{эф} = 0,98\sigma_t$ (наветр. сторона)	$\sigma_{эф} = 0,96\sigma_t$ (подветр. сторона)	$\sigma_{экв} = 0,87\sigma_t$ (наветр. и подветр. сторона)	10

Таблица 6. Результаты измерения НПОН при совместном воздействии давления и ветровых нагрузок

Сечение КА	Внутреннее давление P, МПа							
	0	5		7		9		11
	H_r	H_{r2}	ΔH_{r2}	H_3	ΔH_3	H_4	ΔH_4	H_5
Б-Б	1,58	1,75	0,17	1,77	0,19	1,86	0,28	1,92
								ΔH_5
								0,34

Экспериментальные и теоретические значения напряжений приведены на рисунке 7. При этом для перевода напряженности в напряжения применяли коэффициент $K = 400$.

Как видно, расхождение теоретических и экспериментальных значений составляет не более 5–10 %.

Как было сказано ранее, при определении напряженности при совместном действии давления и ветровых нагрузок ее значение адекватно кольцевому напряжению, возникающему только от внутреннего давления.

Для того чтобы найти экспериментальное значение меридионального напряжения на наветренной стороне, как показали расчеты, можно использовать следующее соотношение:

$$\sigma_m = 0,6 \cdot \sigma_x(\sigma_t)_{\text{эксп}}, \quad (5)$$

где $\sigma_x(\sigma_t)_{\text{эксп}}$ — экспериментально полученное кольцевое напряжение только от внутреннего давления, МПа.

На основании проведенных исследований разработана методика проведения экспериментальных исследований НДС тонкостенной цилиндрической оболочки при воздействии внутреннего давления и изгибающего момента, которая заключается в следующем.

1. На физической модели КА проводится сканирование поверхности с тем, чтобы определить области с повышенными значениями остаточного напряжения.

2. Далее строится зависимость НПОН металла колонного аппарата от напряжения деформированного стального объекта (если отсутствует тарированный график).

3. Осуществляется качественная оценка механического напряжения металла на основе

сравнения измеренной величины напряженности поля остаточной намагниченности металла H_r со значением этого магнитного параметра, соответствующего пределу текучести металла $H_{гт}$ и пределу прочности металла $H_{гв}$ (по данным, приведенным в руководстве к прибору или по тарировочной прямой, построенной на основании экспериментов).

4. Проверяется, выполняется ли условие $H_r \leq H_{гт}$. Если выполняется, то делают заключение о том, что состояние металла данного участка элемента металлоконструкции соответствует области упругой деформации.

5. Если не выполняется условие $H_{гт} < H_r \leq H_{гв}$, то делают заключение о том, что состояние металла данного участка элемента металлоконструкции соответствует области пластической деформации.

6. По наличию локальных максимумов в полученном распределении напряженности поля остаточной намагниченности на проконтролированной поверхности устанавливается наличие и границы области с повышенным НДС металла.

7. Далее выбираются зоны поверхности КА, где наименьшее НДС металла и все дальнейшие измерения проводят для этих зон.

8. Затем в этих зонах производится намагничивание металла и осуществляются первоначальные замеры напряженности без нагрузки.

9. После этого снова осуществляется намагничивание, прикладывают нагрузку (отдельно давление, изгибающие моменты или совместно прикладывают эти нагрузки) и производят замеры НПОН.

Рисунок 7. Теоретические и экспериментальные значения напряжений при совместном воздействии ветровых нагрузок и давления

10. Далее последовательно производят намагничивание, увеличивают нагрузку в зависимости от выбранного диапазона ее изменения, и снимают показания прибора.

11. Осуществляется количественная оценка механического напряжения металла двумя путями:

— либо на основе предварительно полученной экспериментальной зависимости величины напряженности поля остаточной намагниченности от механического напряжения металла;

— либо по разности значений намагниченности при нулевом значении нагрузки и при заданном. При этом для перевода НПОН в механические напряжения определяют тарировочный коэффициент K на основании сравнения теоретических значений напряжений и экспериментальных величин НПОН.

12. Рассчитываются теоретические значения напряжений и сравниваются с определенными экспериментально.

Выводы

1. Произведен теоретический анализ и сравнение эффективного напряжения с кольцевыми, меридиональными и эквивалентными. Установлено, что:

— эффективное напряжение практически аналогично эквивалентному, определенному по четвертой теории прочности. Расхождение эквивалентных и эффективных напряжений составляет 0 % — для линейного НДС и от 10 % до 12 % — для плоского напряженного состояния;

— эффективное напряжение при воздействии R и $M_{изг}$ на наветренной и подветренной сторонах практически одинаково (расхождение от 1 % до 3 %); т. е. в этом случае при экспериментальном определении напряжений НПОН должна быть практически одинакова на наветренной и подветренной сторонах;

— эффективное напряжение на наветренной и подветренной сторонах (при R и $M_{изг}$) с точностью до 3 % адекватно тангенциальным напряжениям $\sigma_x(\sigma_t)$, действующим от внутреннего давления. Это говорит о том, что значения НПОН, определенные только при воздействии давления, и НПОН, определенные при совместном воздействии давления и изгибающего момента должны быть практически одинаковы;

— эффективное напряжение при действии только изгибающего момента адекватно меридиональному напряжению.

2. С использованием прибора ИН-01м осуществлены экспериментальные исследования НДС колонного аппарата и произведено сравнение опытных значений напряжений с теоретическими. Показано, что если измерения произведены в зонах, где остаточные напряжения малы, то наблюдается удовлетворительное совпадение теоретических и опытных величин механических напряжений.

3. Результаты изучения НДС колонного аппарата показывают, что на стадии изготовления могут действовать остаточные напряжения, которые не учитываются в зависимостях, приводимых в нормативной документации при расчетах напряжений, возникающих при действии ветровых нагрузок. Необходимо продолжить исследования НДС и при необходимости ввести поправочные коэффициенты, что повысит надежность расчетов и обеспечит безопасную эксплуатацию оборудования.

4. Создана методика проведения экспериментальных исследований НДС тонких оболочек на основе прибора ИН-01м, с помощью которой можно составить лабораторные работы по дисциплинам «Основы конструирования и расчета технологического оборудования» и «Техническое освидетельствование технологического оборудования», которые повысят качество обучения студентов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Тукаева Р.Б., Амирова Р.Р., Кузеев И.Р. Разработка экспериментального метода исследования напряженно-деформированного состояния и теоретический анализ напряжений при воздействии ветровых нагрузок и внутреннего давления на модель колонного аппарата (Часть I) // Нефтегазовое дело. 2018. Т. 16, № 1. С. 102–109.

2. Дубов А.А. Проблемы оценки остаточного ресурса стареющего оборудования // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2003. № 4. С. 41–44.

3. Кузеев И.Р., Наумкин Е.А., Самигуллин А.В., Зарипов М.З. Особенности распределения магнитных свойств в материале оболочковой конструкции на на-

чальном этапе циклического нагружения // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2015. №1. С. 261–274. URL: http://ogbus.ru/issues/1_2015/ogbus_1_2015_p261-274_KuzeevIR_ru.pdf.

4. Кузеев И.Р., Наумкин Е.А., Кондрашова О.Г. Оценка адаптивности свойств металла по изменению его магнитных характеристик для определения ресурса безопасной эксплуатации нефтегазового оборудования // Нефтегазовое дело. 2006. Т. 4. № 2, С. 124–133.

5. Загидулин Р.В., Загидулин Т.Р. Исследование зависимости поля остаточной намагниченности от напряженно-деформированного состояния металла стального изделия. Ч. 2. // Контроль. Диагностика. 2011. № 8 (158). С. 14–20.

6. Загидулин Р.В., Загидулин Т.Р. Оценка напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса стальных изделий и металлоконструкций по величине поля остаточной намагниченности металла // Матер. 20-й Всерос. науч.-техн. конф. по неразрушающему контролю и технической диагностике (3-6.03.2014). г. Москва, 2014. С. 321–324.

7. ООО «НТЦ «СПЕКТР»: официальный сайт [Электронный ресурс]. URL: <http://ntc-spector.ru/indicators.html>.

8. Загидулин Р.В., Загидулин Т.Р., Аминев А.Ф., Осипов К.О. Зависимость напряженности поля остаточной намагниченности при несогласованном изменении механических напряжений в плоскости металла // Нефтегазовое дело. 2016. Т. 14. № 3. С. 165–173.

REFERENCES

1. Tukaeva R.B., Amirova R.R., Kuzeev I.R. Razrabotka eksperimental'nogo metoda issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya i teoreticheskii analiz napryazhenii pri vozdествii vetrovykh nagruzok i vnutrennego davleniya na model' kolonnogo apparata (Chast' I) [Development of Experimental Method for Stress-Strain State Studying and Theoretical Analysis of Stresses under Wind Loads and Inner Pressure Influence on the Vertical Vessel Model (Part I)]. *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2018, Vol. 16, No. 1, pp. 102–109. [in Russian].

2. Dubov A.A. Problemy otsenki ostatochnogo resursa stareyushchego oborudovaniya [Issues of Aging Equipment Remaining Service Life Period Assessment]. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroyeniye — Chemical and Petroleum Engineering*, 2003, No. 4, pp. 41–44. [in Russian].

3. Kuzeev I.R., Naumkin E.A., Samigullin A.V., Zaripov M.Z. Osobennosti raspredeleniya magnitnykh svoystv v materiale obolochkovoi konstruktssii na nachal'nom etape tsiklicheskogo nagruzheniya [Peculiarities of Magnetic Properties Distribution in the Shell Structure Material at the Initial Stage of Cyclic Loading]. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal «Neftegazovoe delo» — Electronic Scientific Journal «Oil and Gas Business»*, 2015, No. 1, pp. 261–274. URL:

http://ogbus.ru/issues/1_2015/ogbus_1_2015_p261-274_KuzeevIR_ru.pdf. [in Russian].

4. Kuzeev I.R., Naumkin E.A., Kondrashova O.G. Otsenka adaptivnosti svoystv metalla po izmeneniyu ego magnitnykh kharakteristik dlya opredeleniya resursa bezopasnoi ekspluatatsii neftegazovogo oborudovaniya [Assessment of Metal Properties Adaptivity to the Change of its Magnetic Characteristics for Oil and Gas Equipment Safe Operation Life Period Determination]. *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2006, Vol. 4, No. 2, pp. 124–133. [in Russian].

5. Zagidulin R.V., Zagidulin T.R. Issledovanie zavisimosti polya ostatochnoi namagnichennosti ot napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya metalla stal'nogo izdeliya. Ch. 2. [Research of Remanent Magnetization Field Dependence on Deflected Mode of Steel Object. Part 1]. *Kontrol'. Diagnostika — Testing. Diagnostics*, 2011, No. 8 (158), pp. 14–20. [in Russian].

6. Zagidulin R.V., Zagidulin T.R. Otsenka napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya i ostatochnogo resursa stal'nykh izdelii i metallokonstruktssii po velichine polya ostatochnoi namagnichennosti metalla [Steel Products and Metal Structures Stress-Strain State and Remaining Life Period Assessment on the Basis of Metal Remaining Magnetization Field Size]. *Materialy 20 Vseros. nauch.-tekhn. konf. po nerazrushayushchemu kontrolyu i tekhnicheskoi diagnostike, 3-6.03.2014 [Proceedings of 20 All-Russian Scientific and Technical Conference on Nondestructive Control and Technical Diagnostics, 3–6.03.2014]*. Moscow, 2014, pp. 321–324. [in Russian].

7. Official Website of ООО «НТЦ «СПЕКТР» [Electronic Resource]. Available at: <http://ntc-spector.ru/indicators.html>. [in Russian].

8. Zagidulin R.V., Zagidulin T.R., Aminev A.F., Osipov K.O. Zavisimost' napryazhenosti polya ostatochnoi namagnichennosti pri nesoglasovannom izmenenii mekhanicheskikh napryazhenii v ploskosti metalla [Residual magnetic field strength in the conditions of two-dimensional mechanical strain independently changing components]. *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2016, Vol. 14, No. 3, pp. 165–173. [in Russian].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ABOUT THE AUTHORS

Тукаева Римма Борисовна, канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологические машины и оборудование», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Rimma B. Tukaeva, Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Technological Machines and Equipment Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: tukaeva_rb@mail.ru

Амирова Роксана Рашитовна, магистрант, кафедра «Технологические машины и оборудование», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Roksana R. Amirova, Undergraduate Student of Technological Machines and Equipment Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: roksana94@mail.ru

Кузеев Искандер Рустемович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологические машины и оборудование», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Iskander R. Kuzeev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of Technological Machines and Equipment Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: kuzeev2002@mail.ru