РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВЕТРОВЫХ НАГРУЗОК И ВНУТРЕННЕГО ДАВЛЕНИЯ НА МОДЕЛЬ КОЛОННОГО АППАРАТА (ЧАСТЬ 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)

Р. Б. Тукаева
R. B. Tukaeva

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

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

Р. Р. Амирова
R. R. Amirova

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

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

И. Р. Кузеев
I. R. Kuzeev

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

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

Проведен анализ этапов совершенствования метода расчета колонных аппаратов на действие ветровой нагрузки. Обоснована необходимость разработки расчетно-экспериментального метода исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) колонных аппаратов при совместном действии внутреннего давления и ветровых нагрузок. В статье показано, что экспериментальное создание пульсационной составляющей ветровой нагрузки связано с большими трудностями. Поэтому на первом этапе был разработан опытный стенд для создания средней (статической) составляющей ветровой нагрузки. Разработана и реализована экспериментальная установка, позволяющая проводить исследования НДС на физической модели колонного аппарата при воздействии изгибающего момента от ветровой нагрузки и внутреннего избыточного давления. Конструкция модели позволяет имитировать расчетную схему, соответствующую упруго защемленному стержню (с пружинами) и жестко защемленному стержню. Разработано устройство, позволяющее создавать и измерять сосредоточенную ветровую нагрузку.

Лабораторный стенд позволяет визуализировать комплексное действие различных нагрузок на колонный аппарат, что способствует глубокому усвоению теоретического материала, изучению и освоению современных методов и средств, применяемых для проведения экспериментов.

Рассчитаны и проанализированы теоретические значения напряжений при различных сочетаниях нагрузок в зависимости от величины внутреннего избыточного давления и расчетного сечения колонного аппарата, на основании которых в дальнейшем планируется:

- осуществить выбор метода и средства для экспериментального определения напряжений и изучения НДС;
- установить закономерности изменения показаний прибора в зависимости от варьирования и сочетания различных внешних нагрузок;
- составить план экспериментов.

Ключевые слова

колонный аппарат,
ветровая нагрузка,
внутреннее давление,
напряженно-
деформированное
состояние,
теоретические
значения напряжений

Analysis of all stages of improvement of the method of vertical vessels calculation for wind load action was carried out. Necessity for the development of calculation-experimental method for studying vertical vessels stress-strain state (SSS) under inner pressure and wind loads joint action was justified. The article shows that experimental reproduction of wind load pulsation component involves some problems. That is why at the first stage we developed test stand for wind load average (static) component reproduction. Experimental installation allowing performance of SSS studying on the physical model of vertical vessel under the influence of bending moment caused by wind load and inner excessive pressure was developed and realized. Model's construction allows imitating calculation scheme corresponding to elastically-restrained bar (with springs) and rigidly-restrained bar. Device allowing performance of wind load reproduction and measurement was developed.

Laboratory stand allows visualizing complex influence of loads on vertical vessel that contributes to advanced learning of theoretical material, studying and acquisition of modern methods and instruments applied for experiments performance.

Theoretical values of stresses under various loads combinations depending on the inner excessive pressure value and vertical vessel design section were calculated and analyzed; on the basis of which it is planned to:

- choose method and instruments for experimental determination of stresses and SSS studying;
- determine regularities of device readings change depending on variation and combination of various external loads;
- prepare plan of experiments.

Key words

vertical vessel,
wind load,
inner pressure,
stress-strain state,
theoretical
values of stresses

Расчеты на прочность базируются на модельных представлениях, упрощающих конструкцию оборудования. Разработка расчетной схемы сопровождается постоянным анализом допустимых отклонений от реальной конструкции и влияния допущений на ресурс конструкционного материала.

Рассмотрим расчет колонного аппарата (КА), предназначенного для переработки нефти, на прочность. Целью исследования является оценка неоднородности напряженно-деформированного состояния с учетом влияния различных факторов, выявленных в элементах потенциально опасных зон зарождения, развития дефектов на различных стадиях, включая стадию изготовления, и внесения корректив в нормативную документацию.

Кроме этого, такие исследования необходимы и для повышения качества обучения студентов в высших учебных заведениях, поскольку способствуют более глубокому усвоению теоретического материала, изучению и освоению современных методов и средств, применяемых для проведения экспериментов.

Исследования проведены на примере реализации для методики расчета КА от воздействия ветровых нагрузок.

Существующие нормативные документы [1, 2] для расчета аппаратов колонного типа на действие ветровых нагрузок не отвечают на все вопросы, возникающие у конструктора, и требуют изучения реальной картины напряженно-деформированного состояния (НДС) и учета дополнительных факторов. Возникает вопрос о том, насколько ветровая нагрузка су-

щественна в качестве дополнительного нагружающего фактора к нестационарным рабочим нагрузкам [3, 4].

В настоящее время широко применяются численные методы анализа НДС конструкций. Однако адекватность применяемых моделей невозможно оценить без подтверждающих экспериментальных исследований.

На первом этапе исследований решались следующие задачи:

- теоретическое определение напряжений, возникающих в цилиндрическом корпусе колонного аппарата от действия ветровых нагрузок;
- разработка лабораторного стенда с моделью колонного аппарата для проведения экспериментальных исследований.

Обзор литературы показал, что применяемые в настоящее время методики расчета на ветровые нагрузки основаны на применении многих упрощений, касающихся как расчетной схемы и формул, так и истинного распределения напряжений в стенках элементов КА.

В первых нормативных документах, посвященных расчету сооружений от воздействия ветровых нагрузок, ветровая нагрузка вообще не определялась, а находился сразу изгибающий момент в расчетном сечении. В последующих документах определялись ветровые нагрузки отдельно на колонный аппарат, на трубопроводы, площадки и лестницы, а затем в документах появилась общая ветровая нагрузка, которая не подразделялась на составляющие.

В 70-х годах прошлого столетия сначала в строительстве, а затем и в нефтепереработке, ветровую нагрузку начали представлять в виде суммы двух составляющих: статической (средней) P_{ist} и пульсационной (динамической) P_{idyn}

$$P_i = P_{ist} + P_{idyn} \quad (1)$$

Обзор работ, посвященных экспериментальному изучению статической и пульсационной составляющих ветровой нагрузки, показал, что имитация пульсационной составляющей связана с большими трудностями. Поэтому на первом этапе было решено разработать установку и провести исследования НДС колонного аппарата от воздействия только статической составляющей ветровой нагрузки и внутреннего давления.

Для экспериментальных исследований построена модель колонного аппарата, изготовленного из трубы с наружным диаметром 89 мм, толщиной стенки 3 мм.

Высота всего колонного аппарата составила 1300 мм, корпус ограничили стандартными эллиптическими днищами, высота опорной обечайки составила 380 мм. В опорной обечайке выполнено отверстие диаметром 28 мм, имитирующее лаз, на расстоянии

190 мм от опорной поверхности. Модель колонного аппарата прикреплена к опорной поверхности таким образом, чтобы можно было имитировать расчетную схему, соответствующую упруго заземленному стержню (с пружинами) и жестко заземленному стержню (рисунок 1, а).

Установка состоит из экспериментальной модели КА 1, ручного гидравлического насоса 2 для создания внутреннего давления, бака для масла, системы трубопроводов и вентилей (рисунок 1, б).

Величина внутреннего давления измеряется манометром 3, установленным в верхней части ручного насоса 4.

Параметры модели колонного аппарата приведены в таблице 1.

Для создания статической составляющей ветровой нагрузки было разработано специальное приспособление, которое состоит из вертикальной жестко заземленной балки, закрепленной на определенном расстоянии от колонного аппарата. Для придания жесткости балке ее изготовили из швеллера, собственные деформации которого не вносили погрешности при измерении напряжений.

Сосредоточенную статическую составляющую ветровой нагрузки создавали при по-

а) Схема нижнего опорного узла модели колонного аппарата

б) 1 — колонный аппарат; 2 — кран шаровой; 3 — манометр; 4 — ручной насос

Рисунок 1. Лабораторный стенд для исследования НДС колонного аппарата

Таблица 1. Параметры модели колонного аппарата

Наименование	Значение
Материал цилиндрической оболочки	Сталь 20
Диаметр внутренний $D_{в}$, мм	83
Диаметр наружный $D_{н}$, мм	89
Толщина стенки S , мм	3
Общая высота колонного аппарата H , мм	1300
Длина цилиндрической части сосуда $H_{цил}$, мм	870
Высота опорной обечайки, мм	360
Расчетная температура, °C	20
Допускаемое напряжение $[\sigma]_{кор}^t$, МПа	147

мощи обруча с наконечником. Обруч был соединен через динамометр и специальную рукоятку со швеллером. При вращении рукоятки перемещалась горизонтально рейка, соединенная с обручем, который упирался в стенку КА, тем самым создавая точечную нагрузку, аналогичную расчетной схеме ветровой.

Были изготовлены три обруча для создания трех сосредоточенных сил, которые прикладывались в середине каждого участка (рисунок 2).

Колонну разделили на три равных участка, высота которых была принята равной $h_i = 430$ мм. Значения расстояний от опорной поверхности до точек приложения нагрузок x_i приведены в таблице 2.

В качестве динамометра использовался прибор ВД-01.

Рисунок 2. Приспособление для создания ветровой нагрузки

Расчетная схема аппарата представлена на рисунке 3.

Таблица 2. Исходные данные для составления расчетной схемы КА

Номер участка	Внутренний диаметр колонны на участке $D_{вi}$, мм	h_i , м	x_i , м
1	830	0,43	1,075
2	830	0,43	0,645
3	830	0,43	0,215

Рисунок 3. Расчетная схема аппарата

В данной работе цилиндрическая оболочка является тонкостенной, т. к. толщина стенки S составляет менее 0,1 от внутреннего диаметра.

Напряжения определяются по безмоментной теории, на участках, удаленных от узлов сопряжения, т. е. вне зоны действия краевого эффекта (ЗДКЭ).

Длина этой зоны $L_{кр}$ для цилиндрической оболочки вычисляется по приближенной формуле

$$L_{кр} = 2,5\sqrt{r_{с.п.} \cdot S}, \quad (2)$$

где $r_{с.п.} = \frac{D}{2} + \frac{S}{2}$ — радиус срединной поверхности, мм;

S — исполнительная толщина стенки, мм.

Для реальных значений получили длину ЗДКЭ 29 мм. В связи с этим длина зоны корпуса КА, в которой напряжения можно определять по безмоментной теории расчета на прочность, составляет 812 мм.

Допускаемое максимальное давление определили по известной формуле [5]

$$[P]_t = \frac{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma]_{кор} \cdot (S_{исп} - C_{ц})}{D_B + (S_{исп} - C_{ц})}, \quad (3)$$

которое составило 10,26 МПа при $\varphi = 1$ и $C = 0$.

При проведении экспериментов, исходя из величины допускаемого давления, создаваемое рабочее давление не превышало 11 МПа. Для некоторых значений давления теоретические значения напряжений приведены в таблице 3.

Статическую составляющую ветровой нагрузки определяли по известной методике [4], результаты расчета которой приведены в таблице 4.

Значение $q_0 = 850 \text{ Н/м}^2$, которое приняли максимально возможным, а $K = 0,7$; поскольку аппарат не имеет обслуживающих площадок.

Применение максимального значения q_0 обусловлено приложением наибольшей статической ветровой нагрузки и созданием напряжения, которое бы могло быть уловлено прибором для измерения напряжений.

В данной работе изгибающие моменты определялись в следующих расчетных сечениях Б-Б, Г-Г, Д-Д и Е-Е (рисунок 4). Сечения В-В и Г-Г в данной работе совместили ввиду незначительной разницы значений $x_0^{Г-Г}$ и $x_0^{В-В}$.

Расчет вели для трех расчетных сечений только для рабочих условий по следующей формуле:

$$M_v = \sum_{i=1}^n P_i (x_i - x_0). \quad (4)$$

Значения x_0 и изгибающих моментов для различных сечений представлены в таблице 5.

Распределение напряжений кольцевых σ_t^P и меридиональных σ_m^P по поперечному сечению корпуса колонного аппарата от внутреннего давления показано на рисунке 5. На этом же рисунке приведены эпюры меридиональных напряжений от изгибающего момента

Таблица 3. Теоретические значения напряжений, возникающих в цилиндрической оболочке, в зависимости от внутреннего давления вне ЗДКЭ, МПа

Напряжения	Внутреннее давление P , МПа				
	1	2	3	4	5
Кольцевое $\sigma_t^P = \frac{Pr_{с.п.}}{S}$	14,3	28,7	43	57,3	71,7
Меридиональное $\sigma_m^P = \frac{Pr_{с.п.}}{2S}$	7,2	14,3	21,5	28,7	35,8

Таблица 4. Значения статической составляющей ветровой нагрузки P_{ist}

Параметр	Участок		
	1	2	3
Высота участка h_i , м	0,430	0,430	0,430
Расстояние от поверхности земли до центра тяжести участка X_i , м	1,075	0,645	0,215
$\theta_i = \left(\frac{x_i}{10}\right)^{0,31}$	0,5	0,43	0,304
$q_{ist} = q_0 \cdot \theta_i \cdot K$, Н/м ²	297,5	255,85	180,88
$P_{ist} = q_{ist} \cdot D_i \cdot h_i$, МПа	11,38	9,79	6,92

Рисунок 4. Расчетные сечения колонного аппарата

Таблица 5. Значения x_0 и изгибающих моментов

Параметр	Сечение			
	Б-Б	Г-Г	Д-Д	Е-Е
Расстояние от поверхности земли до расчетного сечения x_0 , м	0,490	0,360	0,280	0
Теоретические значения изгибающих моментов, Нм	10,51	10,93	12,62	20,028

Рисунок 5. Распределение напряжений по поперечному сечению корпуса колонного аппарата от внутреннего давления (а); изгибающего момента (б); совместного воздействия давления и изгибающего момента (в)

σ_m^{Pist} (кольцевые равны нулю $\sigma_t = 0$), а также суммарные эпюры $\Sigma\sigma$, соответственно, на наветренной σ_{m1} и подветренной σ_{m2} стороне от совместного воздействия P и M_v .

Формулы для определения напряжений и их значения от действия только изгибающего момента при $C = 0$, а также от совместного воз-

действия внутреннего давления и изгибающего момента для различных расчетных сечений приведены, соответственно, в таблицах 6, 7, 8.

Теоретические расчеты проведены для того, чтобы установить:

— какие максимальные для данной экспериментальной модели колонного аппарата

значения напряжений могут возникать отдельно от внутреннего давления, изгибающего момента и при их совместном воздействии;

— соотношение величин напряжений, возникающих от внутреннего давления и изгибающего момента на наветренной и подветренной сторонах;

— закономерности изменения напряжений для разных сечений колонного аппарата в зависимости от внутреннего давления при совместном воздействии P и $M_{изг}$.

Анализ данных, приведенных в таблицах 6–9, показал, что:

— напряжения от изгибающего момента, возникающего от ветровой нагрузки, значительно меньше, чем напряжения от внутреннего давления (в изучаемом диапазоне), т. е.

основную долю в суммарных напряжениях составляют напряжения от $P_{вн}$;

— напряжения для сечений Г-Г и Б-Б отличаются незначительно друг от друга. Поэтому при экспериментальном изучении будет практически невозможно уловить данную разницу и это необходимо учитывать при составлении плана дальнейших исследований.

Таким образом, полученные данные в дальнейшем будут использованы с целью:

— выбора прибора для экспериментального измерения напряжений;

— установления закономерности изменения показаний прибора в зависимости от варьирования и сочетания различных внешних нагрузок.

Таблица 6. Определение меридиональных напряжений от изгибающего момента в различных сечениях, МПа

Напряжения меридиональные	Сечение			
	Б-Б	Г-Г	Д-Д	Е-Е
$\sigma_{m1}^{P_{ист}}$ (на наветренной стороне)	0,563	0,59	0,68	1,07
$\sigma_{m2}^{P_{ист}}$ (на подветренной стороне)	– 0,563	– 0,59	– 0,68	– 1,07

Таблица 7. Формулы для расчета напряжений от совместного воздействия внутреннего давления и изгибающих моментов

Напряжения	Сечение			
	Б-Б	Г-Г	Д-Д	Е-Е
σ_{m1}	$\frac{P \cdot (D_i + S_i)}{4 \cdot (S_i - C)} + \frac{4 \cdot M_v^{Б-Б}}{\pi \cdot D_i^2 \cdot (S_i - C)}$	$\frac{P \cdot (D_i + S_i)}{4 \cdot (S_i - C)} + \frac{4 \cdot M_v^{Г-Г}}{\pi \cdot D_i^2 \cdot (S_i - C)}$	$\frac{4 \cdot M_v^{Д-Д}}{\pi \cdot D_i^2 \cdot (S_i - C)}$	$\frac{4 \cdot M_v^{Е-Е}}{\pi \cdot D_i^2 \cdot (S_i - C)}$
σ_{m2}	$\frac{P \cdot (D_i + S_i)}{4 \cdot (S_i - C)} - \frac{4 \cdot M_v^{Б-Б}}{\pi \cdot D_i^2 \cdot (S_i - C)}$	$\frac{P \cdot (D_i + S_i)}{4 \cdot (S_i - C)} - \frac{4 \cdot M_v^{Г-Г}}{\pi \cdot D_i^2 \cdot (S_i - C)}$	$-\frac{4 \cdot M_v^{Д-Д}}{\pi \cdot D_i^2 \cdot (S_i - C)}$	$-\frac{4 \cdot M_v^{Е-Е}}{\pi \cdot D_i^2 \cdot (S_i - C)}$
σ_t^P	$\frac{P \cdot (D_i - S_i)}{2 \cdot (S_i - C)}$	$\frac{P \cdot (D_i - S_i)}{2 \cdot (S_i - C)}$	0	0

Таблица 8. Теоретические значения напряжений для сечения Г-Г корпуса КА от совместного действия давления и изгибающего момента, МПа

Напряжения	Расчетные значения давления P , МПа		
	7	9	11
σ_{m1}	84,01	107,84	131,67
σ_{m2}	82,83	106,66	130,49
σ_t^P	83,42	107,25	131,08

Таблица 9. Теоретические значения напряжений для сечения Б-Б корпуса КА от совместного действия давления и изгибающего момента, МПа

Параметр	Расчетные значения давления P , МПа		
	7	9	11
σ_{m1}	83,98	107,81	131,64
σ_{m2}	82,86	106,69	130,52
σ_t^P	83,42	107,25	131,08

Выводы

Разработана лабораторная установка, имитирующая создание статической составляющей ветровой нагрузки и внутреннего давления на модель колонного аппарата.

Рассчитаны и проанализированы теоретические значения напряжений при различных сочетаниях нагрузок в зависимости от величины внутреннего избыточного давления и расчетного сечения колонного аппарата.

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ Р 51273-99. Сосуды и аппараты. Аппараты колонного типа. Нормы и методы расчета на прочность. М.: ИПК Издательство стандартов, 1999. 11 с.
2. ГОСТ Р 51274-99. Сосуды и аппараты. Аппараты колонного типа. Нормы и методы расчета на прочность. М.: ИПК Издательство стандартов, 1999. 19 с.
3. Кузеев И.Р., Миннихметова А.А., Миннихметов А.А. Вывод из консервации реактора установок замедленного коксования // Матер. междунар. науч.-техн. конф. 2014. С. 13–18.
4. Кузеев И.Р., Миннихметова А.А., Гафарова В.А. Трещинообразование в элементах реакторного оборудования // Нефтегазовое дело. 2015. Т.13, № 3. С.140–145.
5. ГОСТ Р 52857.2-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет цилиндрических и конических обечаек, выпуклых и плоских днищ и крышек. М.: Стандартинформ, 2008. 44 с.

REFERENCES

1. *GOST R 51273-99. Sosudy i apparaty. Apparaty kolonnogo tipa. Normy i metody rascheta na prochnost'* [State Standard R 51273-99. Vessels and Apparatus. Vertical Vessels. Norms and Methods of Strength Calculation].

Moscow, IPK Izdatel'stvo Standartov, 1999. 11 p. [in Russian].

2. *GOST R 51274-99. Sosudy i apparaty. Apparaty kolonnogo tipa. Normy i metody rascheta na prochnost'* [State Standard R 51274-99. Vessels and Apparatus. Vertical Vessels. Norms and Methods of Strength Calculation]. Moscow, IPK Izdatel'stvo Standartov, 1999. 19 p. [in Russian].

3. Kuzeev I.R., Minniakhmetova A.A., Minniakhmetov A.A. Vyvod iz Konservatsii Reaktora Ustanovki Zamedlennogo Koksovaniya [Depreservation of Delayed Coking Unit Reactor]. *Materialy mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Materials of the International Scientific and Technical Conference]. 2014, pp. 13–18. [in Russian].

4. Kuzeev I.R., Minniakhmetova A.A., Gafarova V.A. Treshchinoobrazovanie v elementakh reaktornogo oborudovaniya [Reactor equipment elements Fracturing]. *Neftgazovoe delo — Oil and Gas Business*, 2015, Vol. 13, No. 3, pp. 140–145 [in Russian].

5. *GOST R 52857.2-2007. Sosudy i apparaty. Normy i metody rascheta na prochnost'. Raschet tsilindricheskikh i konicheskikh obechaek, vypuklykh i ploskikh dnishch i kryshek* [State Standard R 52857.2-2007. Vessels and Apparatus. Norms and Methods of Strength Calculation. Calculation of Circular and Conic Shells, Dished and Flat Bottoms and Covers]. Moscow, Standartinform Publ., 2008. 44 p. [in Russian].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ ABOUT THE AUTHORS

Тукаева Р. Б., кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологические машины и оборудование», ФГБОУ ВО «УГНТУ», г. Уфа, Российская Федерация

R. B. Tukaeva, Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Technological Machines and Equipment Department, FSBEI HE «USPTU», Ufa, Russian Federation

e-mail: tukaeva_rb@mail.ru

Амирова Р. Р., магистрант, группа ММО31-16-01, кафедра «Технологические машины и оборудование», ФГБОУ ВО «УГНТУ», г. Уфа, Российская Федерация

R. R. Amirova, Undergraduate Student of MMO31-16-01 Group of Technological Machines and Equipment Department, FSBEI HE «USPTU», Ufa, Russian Federation

e-mail: roksana94@mail.ru

Кузеев И. Р., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологические машины и оборудование», ФГБОУ ВО «УГНТУ», г. Уфа, Российская Федерация

I. R. Kuzeev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of Technological Machines and Equipment Department, FSBEI HE «USPTU», Ufa, Russian Federation

e-mail: kuzeev2002@mail.ru