

УДК 622.276.04

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ОПОРНЫХ БЛОКОВ МОРСКИХ СТАЦИОНАРНЫХ ПЛАТФОРМ

Староконь И.В.

*Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина,
Москва, e-mail: starokon79@mail.ru*

В статье анализируются факторы, вызывающие напряженное состояние опорных блоков морских стационарных платформ (МСП). Проанализированы данные о ветро-волновом режиме Субботинского месторождения Черного моря, определены параметры и систематизированы циклы ветро-волновых нагрузок, действующих на платформу. При помощи программного комплекса StructureCAD были определены величины действующих эквивалентных напряжений от веса конструктивных элементов МСП, установленного технологического оборудования, выталкивающей силы водной среды и ветро-волновых нагрузок при различных условиях ориентации луча волны по отношению к опорному блоку. Проанализированы различные варианты конструкций МСП и решена задача о поиске «нулевых элементов». Предложенные решения позволяют разработать комплексную методику оценки напряженного состояния опорного блока МСП. Кроме того, для целей определения усталостной долговечности элементов определены значения эквивалентных напряжений колонн, горизонтальных поясов и раскосов опорного блока МСП.

Ключевые слова: морские стационарные платформы, переменные, стационарные циклы, напряжения, колонны, раскосы, горизонтальные пояса, опорный блок, волновая нагрузка

THE BASE OF THEORY AND PRACTICAL RESULTS OF RESEARCHING STRESS OFFSHORE INSTALATION

Starokon I.V.

Russian State oil and gas university named after I.M. Gubkin, Moscow, e-mail: starokon79@mail.ru

The paper analyzes the factors that cause stress state offshore instllation for product oil and gas (MSP). Base on the data on wind and wave parametrs Subbotinskogo deposits of the Black Sea, the parameters are defined and systematized for cycles wind and wave loads acting on the platform. Using a software package StructureCAD values were determined from the equivalent stresses acting weight structural elements MSP set of process equipment, buoyancy aqueous medium wave and wind loads under various conditions wave beam orientation with respect to the reference block. Analyzed various design options of MSP and solved the problem of finding «zero elements». The proposed solutions will develop a comprehensive methodology for evaluating the stress state of the reference block of MSP. In addition, for purposes of determining the fatigue life of components, the values of equivalent stresses columns, horizontal belts and braces the bearing block of MSP.

Keywords: offshore platforms, variables, stationary cycles, stress, columns, diagonals, horizontal belt, support block, wave load

В современных условиях значительные объемы нефти и газа добываются на морских месторождениях. Эта добыча производится с использованием морских стационарных платформ (МСП), которые имеют разную конструкцию. Выбор типа конструкции определяется условиями окружающей среды. Значительно распространены морские стационарные платформы стержневого типа, использующиеся при добыче на различных глубинах. Эти платформы представляют собой сваренные между собой трубы различных диаметров. На эти платформы воздействуют ветровые, волновые и другие нагрузки, которые вызывают в них различные по направлению и величине напряжения. Методы расчета значений этих нагрузок хорошо описаны в нормативно-технической документации и специализированной литературе. **Целью** настоящей статьи является исследование факторов,

влияющих на напряженное состояние опорного блока МСП, и их численная оценка. Большинство элементов опорного блока МСП находятся в сложно-напряженном состоянии, часто подвергаясь совместному действию изгиба, растяжения, сжатия и кручения. Авторами исследования был проведен анализ 8 отчетов об инспекциях данного типа платформ, расположенных на шельфе Черного моря, который однозначно указал, что наибольшие повреждения платформы обнаружены в зоне переменного смачивания, расположенной от (ниже) –10 метров от уровня моря и (выше) +14 метров от уровня моря. Это зона признана официально с учетом возможной один раз в 100 лет экстремальной волны высотой в 13,9 м (шторм 1982 г.). Однако же фактически, как это следует из [1–5] и показали выполненные авторами расчеты, высота волны, непосредственно вызывающая

усталостное разрушение, не превышает 6,3 метров. И только воздействие экстремальных ветров со скоростью более 49 м/с способно вызвать волну высотой 13,9 м. Автором проведено аналитическое исследование, которое показало, что в элементах подводной части платформы действуют большие по значению напряжения, обусловленные как весовыми характеристиками платформы, так и действием изгибающего и крутящего моментов от ветро-волновой нагрузки (ВВН). В отсутствие ВВН эти напряжения являются статическими и действуют в колоннах МСП вдоль их осей. Если схематично рассматривать колонну как балку с одним зашпеленным и одним консольным концами, то можно увидеть, что максимальные значения напряжений порядка 173 МПа возникают как в точке условного приложения нагрузки, так в точках закрепления колонн к грунту (порядка 250 МПа). Из этого следует, что максимальные суммарные значения напряжений от статической и динамической нагрузки

будут достигаться на участках закрепления к грунту. Однако это справедливо только для колонн. Для горизонтальных элементов максимальные напряжения возникают за счет действия волновых, ледовых и других динамических нагрузок, которые достигают своих максимальных значений в зоне переменного смачивания. Для раскосов справедливы оба этих положения, т.к. помимо динамических нагрузок на них перераспределяется часть нагрузки от веса конструкции. Поэтому зону наибольшего напряжения для раскосов можно будет выявить только в результате расчета. Для исследования напряженного состояния опорного блока МСП необходимо определить параметры ветра, так как параметры волнового воздействия (длина волны, ее высота и период) находятся в зависимости от скоростей ветра. Используя официальную справочную литературу, было установлено, что в районе расположения платформы действуют ветра, которые можно классифицировать по скорости.

Таблица 1

Характеристика ветрового воздействия в районе установки МСП

Скорость ветра	Среднее значение общего количества часов ветра заданной скорости в год	Продолжительность одного цикла в часах	Количество циклов в год
10	1155	21	55
15	1040	20	52
20	153	17	9
25	36	12	3

Помимо приведенных значений возможны также экстремальные значения скорости ветра, вызывающие волновое воздействие с различными значениями обеспеченности, что приводит к увеличению высоты волны

и, как следствие, величины волновой нагрузки. В качестве примера приведем параметры волн Субботинского нефтегазового месторождения, при максимальной скорости ветра 49 м/с.

Таблица 2

Характеристики волн на Субботинском месторождении по данным проекта

Элементы волн	Направление ветра, румбы							
	З	Ю-З	Ю	Ю-В	В	С-В	С	С-З
\bar{h} , м	5,2	6,3	6,3	6,3	4,8	2,8	2,3	2,9
$h_{1\%}$, м	11,7	13,8	13,9	13,8	10,8	6,5	5,3	6,8
\bar{t} , с	7,6	8,5	8,3	8,4	7,3	5,2	4,7	5,5
$\bar{\lambda}$, м	88	108	105	107	81	42	34	45

Проанализируем факторы, вызывающие напряженное состояние опорного блока. Все элементы опорного блока условно можно разделить на колонны, горизонтальные элементы и раскосы. Если проанализировать опорные колонны, то при отсутствии ветро-волнового воздействия значитель-

ные напряжения в этих стойках создаются именно силой тяжести от их собственного веса, веса оборудования, морского обрастания и других весовых факторов. При этом следует учитывать специфическую особенность, присущую всем гидротехническим сооружениям, а именно выталкивающую

силу на элементы, погруженные в водную среду [1, 3-5]. Существуют также колонны с заполнением внутритрубного пространства бетоном, в результате чего происходит перераспределение напряжений. Метод расчета трубных конструкций с заполнением их бетоном детально рассмотрен в работе [2]. Кроме того, в программном комплексе СКАД разработан специальный модуль для расчета трубобетонных стержней. Помимо сжимающих сил, обусловленных силами тяжести, на конструктивные элементы МСП в горизонтальном направлении действуют различные нагрузки (волновая, ветровая и др.) [1, 5]. Отметим, что в соответствии с СНиП «Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения» для вертикальных элементов возможно представить волновую нагрузку как сосредоточенную силу с определенной координатой, отсчитываемой от поверхности моря, либо как неравномерно распределенную нагрузку.

Перейдем к рассмотрению горизонтальных поясов. Как показали расчеты, горизонтальные пояса в большинстве случаев загружены значительно меньше, чем колонны и раскосы. И только в зоне переменного смачивания величины этих напряжений достигают своих максимальных значений, близких к величинам максимальных напряжений в колоннах и раскосах. Схема нагрузок для элементов, расположенных горизонтально, также изменяется. В отсутствии ВВН весовые нагрузки уже не будут играть столь важное значение при формировании напряженного состояния элемента, как в случае с колонной либо раскосом. При этом со стороны колонн в зависимости от направления луча волны могут формироваться как крутящий, так и изгибающий моменты, которые в некоторых случаях могут действовать одновременно.

Анализ показал, что все силы и нагрузки, действующие на раскосы опорного блока МСП, во многом аналогичны нагрузкам горизонтальных элементов, за исключением наличия в них значительных продольных усилий, обусловленных силами тяжести. Поэтому способы оценки напряженного состояния для колонн и горизонтальных элементов аналогичны методам оценки напряженного состояния раскосов.

Важным является вопрос об оценке напряженного состояния платформы. По мнению автора, этот вопрос целесообразно решать при помощи современных теорий прочности, которые позволяют найти значения «эквивалентного» напряжения. Для решения этой задачи выделим вокруг некоторой точки конструктивного элемента опорного блока параллелепипед с ребрами

бесконечно малой длины. На гранях этого элементарного параллелепипеда в общем случае могут действовать нормальные и касательные напряжения. Совокупность напряжений на всевозможных площадках, проходящих через точку, называется напряженным состоянием материала в точке. Доказано, что можно так расположить в пространстве параллелепипед, что на его гранях останутся только нормальные напряжения. Такие грани называются главными площадками, а напряжения на них – главными напряжениями. Наибольшее главное напряжение обозначается σ_1 , наименьшее – σ_3 , а промежуточное – σ_2 [1].

Рассмотрим напряженное состояние опорного блока морской стационарной платформы на примере МСП, установленной на Субботинском месторождении. Практика проектирования и эксплуатации подобных платформ показывает, что учет взаимовлияния различных элементов платформы является крайне сложной задачей. Для анализа напряженного состояния платформы была построена компьютерная модель в программном комплексе StructureCAD. Анализ напряженного состояния удобнее проводить, рассчитав значения эквивалентных напряжений для каждого элемента. Для оценки напряжений, возникающих в элементах платформы, модель была нагружена нагрузками, влияющими на ее усталостное разрушение, а именно были заданы: нагрузки от собственного веса, от веса оборудования и морского обрастания, выталкивающей силы водной среды (комбинация нагрузок K_1) и нагрузка от ветро-волнового воздействия (ВВН). Причем для учета взаимовлияния элементов направление развития ветро-волновой нагрузки задавалось как по оси X (комбинация нагрузок K_2), так и в направлении под углом 45° к оси X (комбинация нагрузок K_3). Величина волновой нагрузки была выбрана соответствующей волновому воздействию 1% обеспеченности. Конструктивно платформа представляет собой фермовую конструкцию из труб и имеет пять секций, высота каждой из которых составляет приблизительно десять метров. В результате исследования были получены следующие результаты. Анализ колонн опорного блока МСП показывает, что максимальные значения эквивалентного напряжения (ЭН), возникающие в колоннах придонной секции (1 секция) внешним диаметром 720 мм и толщиной стенки 20 мм, появляются при воздействии ветро-волновой нагрузки под углом 45 градусов и составляет 250 МПа. При отсутствии ВВН напряжение составляет 45 МПа. Это доказывает тот факт, что напряжения в колонне

создаются не только от весовых факторов, но и от ветро-волнового воздействия, в результате которых появляются значительные изгибающие и крутящие моменты. Во второй секции максимальное напряжение также возникает при ветро-волновой нагрузке под углом 45 градусов и, незначительно отличаясь от придонной, составляет 242 МПа и при отсутствии ветро-волновой нагрузки 43 МПа. В следующей третьей секции максимальное значение напряжения возникает при тех же условиях, что и в первых двух секциях, но составляет уже значительно меньшую величину в 115 МПа. При отсутствии воздействия величина напряжения составляет всего 18 МПа. Такое снижение напряжения обусловлено тем, что в этой зоне весовые нагрузки значительно перераспределяются на раскосы. Далее для колонн, находящихся в зоне переменного смачивания, происходит увеличение значений максимальных эквивалентных напряжений, что связано с конструктивной особенностью платформы и вызвано проектным уменьшением площади поперечного сечения в результате применения труб с толщиной стенки на 25% меньше, а также более высокими значениями ветро-волновой нагрузки в этой зоне. Максимальное значение ЭН составит 197 МПа. В атмосферной зоне влияние волнового воздействия несколько снижается, однако действие изгибающих и крутящих моментов не прекращается, и максимальные значения ЭН составляют 173 МПа. А при отсутствии ВВН величина ЭН достигает значения 51 МПа. Такое увеличение значения ЭН объясняется конструктивными особенностями платформы и связано с тем, что данный элемент колонны является не наклонным, как предыдущие, а вертикальным. Кроме того, на данном участке отсутствуют раскосы. Анализ горизонтальных поясов (ГЭ) ферм, выполненных из труб диаметром 420 мм и толщиной стенки 12 мм, показал, что минимальное напряженное при ВВН состояние, равное 75 МПа, достигается в ГЭ, расположенной в придонной зоне. Затем, во второй зоне, происходит незначительное повышение величины эквивалентных напряжений. В третьей зоне, с увеличением ВВН, на 22% повышается величина напряжений, максимальные значения ЭН достигают 92 МПа. Конструктивно в атмосферной и периодического смачивания зонах горизонтальные элементы выполнены из труб 325 диаметра с толщиной стенки 12 мм, что снижает площадь поперечного сечения. Однако в этих зонах волновая нагрузка достигает своих максимальных значений, поэтому величины напряжений в этих зонах практически

не отличаются от третьей зоны. Перейдем к анализу ЭН, возникающих в раскосах. При отсутствии ВВН значения ЭН в раскосах значительно превышают аналогичные значения в колоннах и горизонтальных элементах. Это говорит о том, что действие комбинации весовых нагрузок значительно перераспределяется с колонн и ГЭ на раскосы. Максимальные значения ЭН достигаются при комбинации K_2 , сохраняя значение порядка 200 МПа и постепенно возрастая с усилением действия ВВН, достигают своего максимума в зоне периодического смачивания, после чего значительно снижаются в атмосферной зоне.

Значительный практический интерес представляет собой исследование опорного блока МСП на так называемые «нулевые» элементы, т.е. ненагруженные элементы. Проведем расчеты величин эквивалентных напряжений для двух случаев:

- 1) в опорном блоке отсутствуют раскосы и горизонтальные элементы;
- 2) в опорном блоке отсутствуют только раскосы;
- 3) в опорном блоке отсутствуют только горизонтальные пояса.

Разработаем соответствующие приведенным трем случаям компьютерные модели и проведем расчеты значений максимальных эквивалентных напряжений. Если создать платформу, состоящую исключительно из колонн, то при отсутствии ВВН напряжения, возникающие в них, не будут превышать допустимого напряжения для стали 17Г1С, из которой выполнены колонны, равного 252 МПа. Однако при наличии ВВН как для комбинаций загрузки K_2 , так и K_3 значения напряжений существенно превышают допустимое напряжение. Для случая № 2, при котором колонны соединены горизонтальными поясами, в первой и второй секциях колонн происходит даже некоторое увеличение значений ЭН, что объясняется возникновением дополнительных крутящих моментов. В третьей, четвертой и пятой секциях происходит снижение величины ЭН. При этом напряжения в горизонтальных поясах платформы при наличии ВВН существенно превышают уровень допустимых напряжений. Ситуацию сильно изменяет введение раскосов, которые перераспределяют на себя значительную часть нагрузки и снижают действующие напряжения практически до отсутствующего уровня напряжений, даже при отсутствии горизонтальных поясов. Таким образом, можно сделать вывод о том, что раскосы играют более важную роль в снижении напряженного состояния платформы, чем горизонтальные элементы.

Таблица 3

Значения эквивалентных напряжений элементов опорного блока при различных комбинациях загрузки и различных конструктивных решениях

Комбинации нагрузок	<i>Номера секций опорного блока МСП</i>														
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
	<i>Значения эквивалентных напряжений, МПа</i>														
	Колонны					Горизонтальные пояса					Раскосы				
K_1	45	43	18	32	51	6	7	32	17	20	77	50	104	112	57
K_2	169	168	65	91	89	35	48	82	119	27	209	198	267	344	100
K_3	250	242	115	197	173	71	75	92	250	182	208	186	206	196	120
<i>Значения эквивалентных напряжений для случая 1 (отсутствуют раскосы и горизонтальные пояса), МПа</i>															
K_1	158	159	310	367	508	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
K_2	294	464	1092	1416	1573	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
K_3	2147	1283	1722	2673	2314	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
<i>Значения эквивалентных напряжений для случая 2 (отсутствуют только раскосы), МПа</i>															
K_1	273	247	243	365	409	11	275	261	266	16	–	–	–	–	–
K_2	1213	901	972	1213	1345	93	448	312	358	2	–	–	–	–	–
K_3	1771	1361	1375	2141	1954	290	2666	2658	2294	82	–	–	–	–	–
<i>Значения эквивалентных напряжений для случая 3 (отсутствуют только горизонтальные пояса), МПа</i>															
K_1	72	55	26	30	90	–	–	–	–	–	79	32	75	127	51
K_2	313	275	138	143	186	–	–	–	–	–	287	252	229	392	28
K_3	450	405	203	211	123	–	–	–	–	–	235	23	306	256	60

Таблица 4

Значения эквивалентных напряжений элементов опорного блока при различных параметрах волнового воздействия и комбинациях загрузки

Максимальные и минимальные значения цикла нагрузки	Комбинации нагрузок	<i>Номера секций опорного блока МСП</i>														
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
		<i>Значения эквивалентных напряжений, МПа</i>														
		Колонны					Горизонтальные пояса					Раскосы				
	K_1	45	43	18	32	51	6	7	32	17	20	77	50	104	112	57
<i>Скорость ветра 15 метров/секунду, $h = 2,29, T = 6,88, \lambda = 73,9$</i>																
Максимальные значения цикла	K_2	48	46	19	34	52	7	8	33	20	20	81	54	108	118	58
	K_3	51	48	21	36	54	8	9	34	23	24	81	54	107	114	59
Минимальные значения цикла	K_2	42	40	17	30	50	5	6	31	14	20	73	46	100	106	56
	K_3	39	38	15	28	48	4	5	30	11	16	73	46	101	110	55
<i>Скорость ветра 20 метров/секунду, $h = 3,26, T = 8,15, \lambda = 104$</i>																
Максимальные значения цикла	K_2	52	50	21	35	53	8	9	35	23	20	84	58	113	125	59
	K_3	56	54	23	41	58	10	11	35	30	29	84	58	110	117	61
Минимальные значения цикла	K_2	38	36	15	29	49	4	5	29	11	20	70	42	95	99	55
	K_3	34	32	13	23	44	2	3	29	4	11	70	42	98	107	54
<i>Скорость ветра 25 метров/секунду, $h = 4,45, T = 8,91, \lambda = 126$</i>																
Максимальные значения цикла	K_2	57	56	23	38	55	9	11	37	27	21	90	65	120	135	61
	K_3	66	63	28	49	63	13	14	38	40	36	90	64	114	120	63
Минимальные значения цикла	K_2	33	31	13	26	47	3	3	27	7	19	64	35	88	89	53
	K_3	25	23	8	16	39	-1	0	26	-6	4	64	36	94	104	51

Важное практическое значение для установления долговечности элементов опорного блока имеет установление параметров напряжений, возникающих в результате действия различных волновых нагрузок. В табл. 4 приведены значения эквивалентных напряжений, полученных в результате задания ВВН при различных скоростях ветра.

Список литературы

1. Бородавкин П.П. Морские нефтегазовые сооружения: учебник для вузов. Часть 1. Конструирование. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2006. – 555 с.
2. Кикин А.И., Санжаровский В.С., Труль В.А. Конструкции стальных труб заполненных бетоном. – М.: Изд-во «Стройиздат», 1974. – 145 с.
3. Староконь И.В. Основы теории и практики образования усталостных трещин на морских нефтегазовых сооружениях // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 4; URL: www.science-education.ru/104-6605.
4. Староконь И.В. Методика исследования напряженного состояния сварных соединений опорных блоков морских стационарных платформ // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 10 (15). – С. 3394–3399.
5. СП 38.13330.2010 «СНиП 2.06.04-82» Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов)» Минрегион России. – 2011. – 116 с.

References

1. Borodavkin P.P. Morskie neftegazovye sooruzhenija: Uchebnik dlja vuzov. Chast' 1. Konstruirovanie. M.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2006. 555 p.
2. Kikin A.I., Sanzharovskij V.S., Trul' V.A. Konstrukcii stal'nyh trub zapolnennyh betonom// Moskva, izdatel'stvo «Strojizdat», 1974. 145 p.
3. Starokon' I.V. Osnovy teorii i praktiki obrazovanija ustalostnyh treshhin na morskikh neftegazovykh sooruzhenijah // Sovremennye problemy nauki i obrazovanija. 2012. no. 4; URL: www.science-education.ru/104-6605.
4. Starokon' I.V. Metodika issledovanija naprjazhennogo sostojanija svarnykh soedinenij opornykh blokov morskikh stacionarnykh platform // Fundamental'nye issledovanija. 2013. no. 10 (15). pp. 3394–3399;
5. SP 38.13330.2010 «SNiP 2.06.04-82» Nagruzki i vozdeystvija na gidrotehniczeskie sooruzhenija (volnovye, ledovye i ot sudov)» Minregion Rossii, 2011. 116 p.

Рецензенты:

Бородавкин П.П., д.т.н., профессор, генеральный директор АО «Интергаз», г. Москва;

Литвин И.Е., д.т.н., генеральный директор ООО «СТД», г. Москва.

Работа поступила в редакцию 19.12.2014.