

**СТАТИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ
И ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ
СМЕЩЕНИЯ ГЛУБОКОВОДНОЙ
SPAR СИСТЕМЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ
ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ТЕЧЕНИЙ
В ЧЕРНОМ МОРЕ**

А.С. Тертышников

Севастопольский национальный
технический университет
E-mail: sherra1989@rambler.ru

В статье приводятся расчеты максимально допустимых горизонтальных и угловых смещений глубоководной буровой платформы под воздействием статических нагрузок.

Введение. Разработка проектов буровых платформ для глубоководного бурения относится к числу наиболее приоритетных направлений современных морских технологий. Наиболее перспективным вариантом конструкции подобных установок является SPAR система, обладающая следующими преимуществами: простота и технологичность конструкции; относительная простота операций по установке и съему платформы; высокая стабильность пространственного положения при воздействии экстремальных волн и течений.

Важной задачей на этапе эскизного проектирования буровой платформы является определение статических нагрузок и смещений платформы под действием экстремальных морских течений. При этом следует отметить, что в отечественной литературе отсутствуют работы, посвященные решению указанной проблемы для SPAR платформ.

С эксплуатационной точки зрения контроль смещения буровой установки под действием внешних сил также очень важен. Определять горизонтальное смещение платформы можно, используя

спутниковые данные о ее положении, а для определения угловых смещений (крена и дифферента) необходимы специальные измерительные системы на основе инклинометров.

Настоящая работа посвящена определению допустимых пределов статического смещения установки. Для решения данной задачи был использован программный комплекс «Anchored Structures», одобренный Российским Морским Регистром Судоходства и имеющий «Сертификат о типовом одобрении на программу для ЭВМ» № 07.00550.010 от 20 марта 2007 г.

Метод расчета статических нагрузок. Для расчета гидростатического и гидродинамического давления жидкости на корпус сооружения необходимо разбить смоченную поверхность объекта на элементарные участки, которые позволили бы произвести численное интегрирование давления жидкости по данной поверхности. Разбивка производится на плоские (или близкие к плоским) трапеции.

Расчет сил и кренящих моментов от ветра. Постоянная составляющая ветровой нагрузки на сооружение рассчитывается по формуле:

$$F = \rho_a \bar{V}_w^2 C_w A_w (\alpha_w - x_6) / 2, \quad (1)$$

где \bar{V}_w – расчетная средняя скорость ветра, м/с; ρ_a – плотность воздуха; $A_w(\alpha_w)$ – функция площади парусности от угла направления ветра относительно сооружения; C_w – коэффициент сопротивления; x_6 – угол поворота сооружения в плане (угол рыскания).

Затем формируется полный вектор ветровой нагрузки по 6-ти степеням свободы:

$$\mathbf{F}_{wind} = \begin{pmatrix} F \cos(\alpha_w) \\ F \sin(\alpha_w) \\ 0 \\ -F \sin(\alpha_w)(z_w - Z_g) \\ F \cos(\alpha_w)(z_w - Z_g) \\ F \sin(\alpha_w - x_6)(x_w(\alpha_w - x_6) - X_g) - F \cos(\alpha_w - x_6)(y_w - Y_g) \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где (x_w, y_w, z_w) – координаты точки приложения ветровой нагрузки, причем $x_w(\alpha)$ – круговая диаграмма абсциссы точки приложения, необходимая для судов и других длинномерных объектов.

Расчет сил и моментов от течения. Расчет сил и моментов от течения предполагает наличие априорных сведений о площади подводной парусности объекта и сопротивлении при обтекании сооружения под различными углами. Для течения сила F_{cur} , действующая на сооружение, находится по формуле:

$$F_{cur} = \rho_v V_{cur}^2 C_{cur} A_{cur}(\alpha_{cur} - x_6) / 2, \quad (3)$$

$$\mathbf{F}_{cur} = \begin{pmatrix} F_{cur} \cos(\alpha_{cur}) \\ F_{cur} \sin(\alpha_{cur}) \\ 0 \\ -F_{cur} \sin(\alpha_{cur})(z_{cur} - Z_g) \\ F_{cur} \cos(\alpha_{cur})(z_{cur} - Z_g) \\ F_{cur} \sin(\alpha_{cur} - x_6)(x_{cur}(\alpha_{cur} - x_6) - X_g) - F \cos(\alpha_{cur} - x_6)(y_{cur} - Y_g) \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Расчет реакции системы якорения. Важной проблемой как при статическом, так и при динамическом расчете сооружения является определение влияния якорных связей на нагрузки и смещения платформы. Программный комплекс «Anchored Structures» позволяет рассчитывать параметры якорных систем удержания (ЯСУ) различных конфигураций. В рассматриваемом случае применялась распространенная ЯСУ, представляющая собой комбинацию стального троса и якорной цепи.

Расчет напряжений в якорных связях производится квазистатическим методом, при этом натяжение и траектория линии являются функцией положения клюзовой точки сооружения. При расчете якорных связей учитываются их растяжение, наличие массивов и плавучестей, расположенных на связях и предназначенных для изменения траектории провисания и жесткостных характеристик связей, возможность укладки части связи на дно акватории, которое, в свою очередь, может иметь наклон.

Для расчета реакции отдельной якорной связи производится решение систе-

где V_{cur} – скорость течения; α_{cur} – направление течения; $A_{cur}(\alpha)$ – функция эквивалентной площади сечения подводной парусности от угла направления течения по отношению к сооружению; C_{cur} – коэффициент сопротивления при обтекании сооружения жидкостью; ρ_v – плотность воды.

Координаты эквивалентной точки приложения этой силы $(x_{cur}, y_{cur}, z_{cur})$ задаются. Полный вектор течения в 6-ти степенях свободы относительно центра тяжести сооружения находится по формуле:

мы двух нелинейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^M z_i(T_x, T_z) = Z_{kl} - Z_a \\ \sum_{i=1}^M x_i(T_x, T_z) = X_{kl} - X_a \end{cases}, \quad (5)$$

где T_x, T_z – соответственно горизонтальная и вертикальная составляющие натяжения связи в клюзовой точке (являются двумя неизвестными в системе уравнений); z_i, x_i – соответственно вертикальная и горизонтальная проекции однородного участка связи (имеющего постоянные значения диаметра, погонного веса и модуля упругости Юнга), зависящие от вертикальной и горизонтальной проекций натяжения связи на верхнем конце этого участка; M – число таких участков на связи; Z_{kl} – ордината клюзовой точки относительно поверхности воды; Z_a – глубина расположения якоря; X_{kl}, X_a – абсциссы соответственно клюзовой точки и якоря в плоскости провисания связи.

Проекции участков связи в системе уравнений (5) определяются по пред-

ставленным ниже соотношениям координат и натяжений связи.

$$\begin{aligned} x_i(T_x, T_z) &= T_x (\ln((1 - \sin(\alpha_{i+1}))(1 + \sin(\alpha_i))) / \\ & / ((1 + \sin(\alpha_{i+1}))(1 - \sin(\alpha_i)))) / 2 / q_i + l_i E_i F_i, \\ z_i(T_x, T_z) &= T_x (1 / \cos(\alpha_i) - 1 / \cos(\alpha_{i+1})) / q_i + (T_x^2 + T_{zi}^2 - T_x^2 / \cos^2(\alpha_{i+1})) E_i F_i / 2 / q_i, \\ T_{zi} &= T_z - \sum_{j=1}^{i-1} (q_j l_j + g(M_{mj} - \rho V_{mj})), \end{aligned} \quad (6)$$

где $\alpha_i = \arctan(T_{zi} / T_x)$; T_{zi} – вертикальная составляющая натяжения связи в верхней точке i -го участка; α_i – угол наклона касательной к i -му участку связи в верхней точке; q_i, l_i, E_i, F_i – соответственно погонный вес (в воде), длина, модуль Юнга и площадь сечения i -го однородного участка; M_{mj}, V_{mj} – соответственно масса и объем массива (пригруза), расположенного между j -ым и $j+1$ -ым участками связи; g – ускорение свободного падения.

Первый участок начинается от ключевой точки, последний заканчивается у якоря. Данные зависимости получены в результате аналитического решения уравнений свободно провисающей гибкой весомой и растяжимой связи и яв-

ляются более точными по сравнению с широко известным уравнением цепной линии, которое не учитывает растяжения связей [1].

Исходные данные.

Характеристики плавучей буровой установки типа SPAR

Диаметр колонны – 30 м
Осадка эксплуатационная – 158 м
Водоизмещение – 170000 т

Параметры якорных связей представлены в табл. 1.

Гидрометеоусловия [2]

Глубина моря – 2000 м
Скорость ветра – 29,0 м/с
Скорость течения поверхностного 30-ти метрового слоя – 1,5 м/с

Таблица 1

Характеристики якорных связей

Наименование характеристики	Величина	
	Грос	Цепь
Диаметр, мм	190	152
Разрывное усилие, кН	21746	14430
Вес 1 м связи в воде, кН/м	1,9	4,15
Модуль прочности E , кН/мм ²	70	56
Начальное натяжение, кН	11000	–
Расчетная длина связей, м	3900	300

Результаты расчета. При определении нагрузок рассмотрено самое неблагоприятное сочетание воздействия ветра и течения. В соответствии с требованием п.4.3.3 части III Правил ПБУ [3] все силы действуют в одном направлении.

$F_1 = 922,17$ кН – ветровая нагрузка;
 $F_2 = 2129,90$ кН – нагрузка от течения;
 $F_3 = 3052$ кН – суммарная статическая нагрузка.

Опрокидывающий момент составляет 129763 кН*м.

Расчет показал, что рассмотренная в [4] система закоренения не обеспечивает

удержание платформы на точке бурения (смещение установки под действием внешних сил составляет 30,49 м, что превышает допустимое значение). В связи с этим было принято решение увеличить натяжение якорных связей и изменить их параметры на представленные в табл. 2.

Под действием вышеуказанных сил платформа сместится на 14,66 м, что составляет 0,73 % от глубины акватории (допустимым для технологии морских буровых работ является смещение до 1,5 % от глубины).

Измененные параметры якорных связей

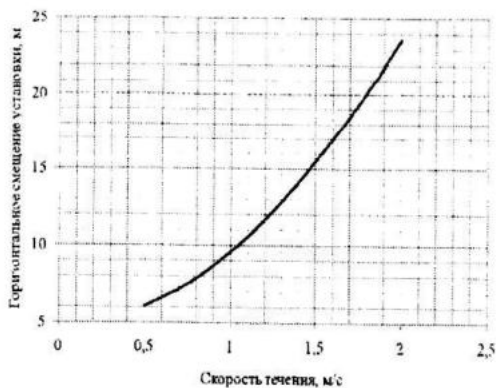
Наименование характеристики	Величина	
	Трос	Цепь
Диаметр, мм	250	152
Разрывное усилие, кН	37630	14430
Вес 1 м связи в воде, кН/м	3,29	4,15
Модуль прочности E , кН/мм ²	70	56
Начальное натяжение, кН	20314	—
Расчетная длина связей, м	3900	700

Возникающие под действием статических нагрузок натяжения в якорных связях не превышают 20700 кН, что соответствует коэффициенту запаса прочности 1,81.

Помимо рассчитанных параметров интерес представляют и следующие зависимости:

1. Зависимость горизонтального смещения установки от скорости эффективного течения (от 0,5 м/с до 2 м/с с шагом 0,25 м/с). График зависимости приведен на рис. 1.

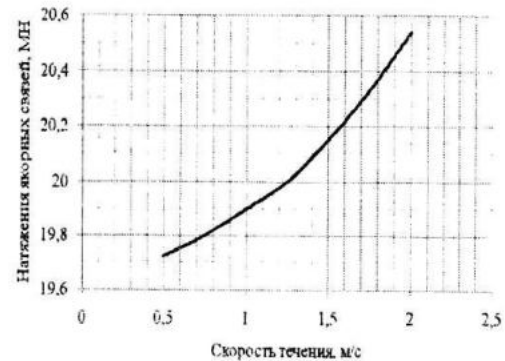
2. Зависимость максимального натяжения якорных связей от скорости течения (от 0,5 м/с до 2 м/с с шагом 0,25 м/с). График зависимости приведен на рис. 2.



Р и с. 1. График зависимости горизонтального смещения установки от скорости течения

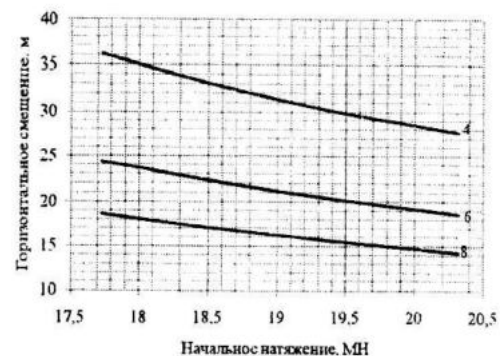
С возрастанием скорости течения смещение установки растет, однако не выходит за допустимые пределы.

По графику на рис. 2 можно оценить, какой калибр связи потребуется для удержания установки при воздействии на нее течения определенной скорости (исходя из условия обеспечения необходимого запаса прочности связи).



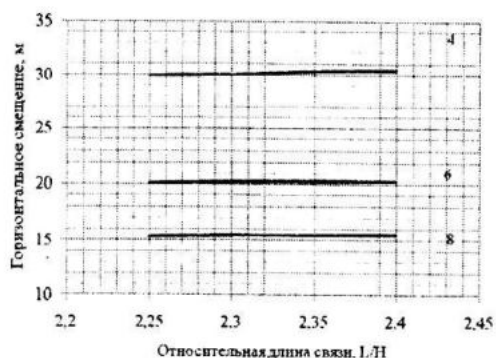
Р и с. 2. График зависимости максимального натяжения якорных связей от скорости течения

График на рис. 3 показывает, что при увеличении натяжения связей смещение установки уменьшается, однако при значительном увеличении натяжения невозможно обеспечить требуемый запас прочности якорных связей. Из трех рассмотренных вариантов, система из восьми якорных связей является наиболее предпочтительной, поскольку обеспечивает наименьшее смещение установки при прочих равных условиях.



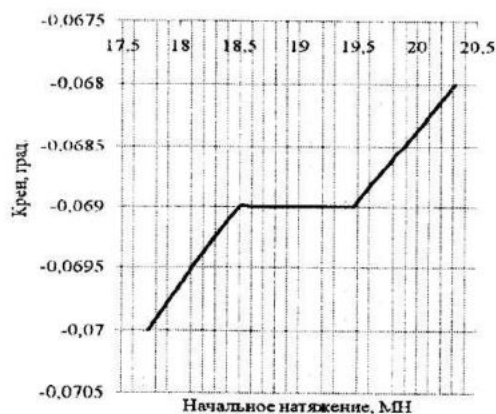
Р и с. 3. График зависимости горизонтального смещения установки от начального натяжения при различном количестве якорных связей – 4, 6 и 8

Из графика на рис. 4 видно, что горизонтальное смещение весьма незначительно зависит от длины связи.



Р и с. 4. График зависимости горизонтального смещения установки от относительной длины связи

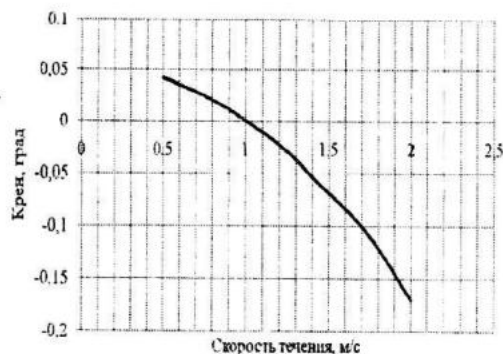
Помимо горизонтального смещения, принципиальным для проведения буровых работ является также и угол крена буровой установки. На рис. 5 и 6 приведены графики зависимости угла крена установки от начального натяжения связей и скорости течения соответственно. По данным графикам можно сделать вывод о том, что угол крена незначителен и не может помешать проведению буровых работ.



Р и с. 5. График зависимости углового смещения установки от начального натяжения связей

Заключение. В результате выполненной работы были рассчитаны статические нагрузки и пространственные смещения ПБУ типа SPAR в соответствии с Правилами РМРС [3]. Результаты расчета показали, что нагрузки, вызванные воздействием ветра и течения, в достаточной мере уравниваются якорной системой. Возникающие под

действием указанных сил смещения не превышают допустимых.



Р и с. 6. График зависимости углового смещения установки от скорости течения

Результаты данной работы впоследствии будут использоваться для более детальной разработки якорной системы глубоководной буровой платформы типа SPAR, а также для расчетов динамических нагрузок, действующих на установку и систему ее удержания во время сильного шторма.

Кроме того, результаты настоящей работы могут быть использованы для определения максимально допустимого горизонтального и углового смещения установки при различных внешних условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.С. Большев, С.А. Фролов и др. Программа "ANCHORED STRUCTURES". Ассоциация Центров Инжиниринга и Автоматизации, СПб., 2002. – 250 с.
2. Кушнир В.М., Федоров С.В., Петренко Л.А. Реакция Азово-Черноморского бассейна на интенсивный циклон 10-11 ноября 2007 г по спутниковым данным. Морские испытания. 2008. №1, С. 62 – 71.
3. НД № 2-020201-008 Правила классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок и стационарных платформ. Российский морской регистр судоходства – СПб.: Российский морской регистр судоходства 2008 г. – 480 с.
4. Тертышников А.С., Благовидова И.Л., Кушнир В.М. Параметры системы позиционирования глубоководной буровой платформы. Вестник СевНТУ. Вып. 106: Механика, энергетика, экология, Севастополь, 2010, С. 164 – 167.