

УДК 62.50

**В.А. Крамарь, д-р техн. наук,****А.А. Кабанов, канд. техн. наук****Д.Б. Татарков, канд. ист. наук, магистрант кафедры ОиК***Севастопольский национальный технический университет**ул. Университетская 33, г. Севастополь, Украина, 99053**E-mail: kramarv@mail.ru*

## МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ НАТЯЖЕНИЕМ КОЛОНН ПЛАТФОРМ TLP НА ОСНОВЕ МОДЕЛЕЙ ДИНАМИКИ

*Приводится полная динамическая модель движения колонн платформы TLP. Предложена методика исследования и проектирования систем управления натяжением колонн.*

**Ключевые слова:** платформа TLP, колонна TTR, уравнение динамики, взаимодействие колонн, управление натяжением.

По мере возрастающего спроса на энергоносители и истощения запасов ресурсов очевидна важность задачи освоения запасов нефти и газа на континентальном шельфе. Активная деятельность в этом направлении началась с 60-х гг. XX века.

Основной отличительной особенностью места работы буровых платформ является глубина акватории, исходя из которой выделяют три основных группы установок: 1) погружные установки (стационарные платформы), которые могут быть использованы на глубинах, не превышающих 50 м; 2) на глубинах до 120 м – чаще других используются самоподъемные буровые установки (СПБУ); 3) при необходимости увеличения глубин неоспоримые преимущества полупогружных буровых установок, которые успешно применяются на участках шельфа глубиной свыше 500 м [1].

Производство нефти в открытом море началось главным образом в мелких водах. Так как эти источники эксплуатировались вместе с увеличивающимися потребностями в нефти и газе, нефтяная индустрия перемещалась дальше в глубокие воды, где на первый план стали выходить полупогружные буровые установки (ППБУ). Эволюция буровых установок показана на рисунке 1.

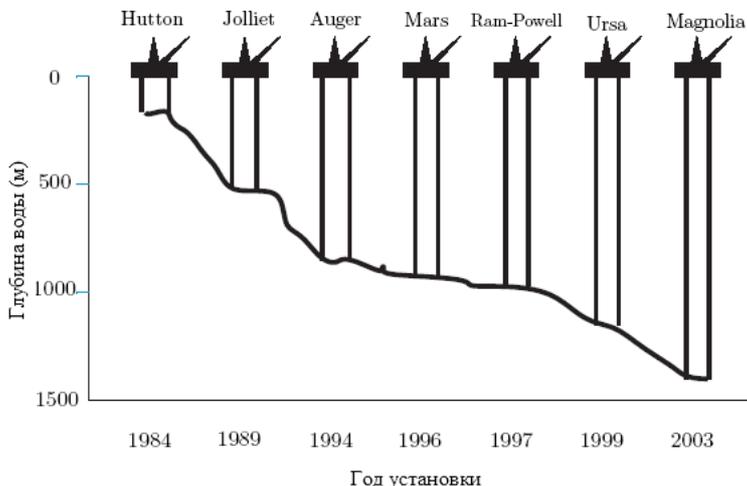


Рисунок 1 – Эволюция буровых установок и глубины их колонн

Существуют две основные проблемы ППБУ при бурении на больших глубинах акватории: совершенствование систем удержания платформы на заданной точке и устройств, предназначенных для связи плавающей платформы с морским дном. В последние годы широкое распространение получили платформы-буи (Spag-платформы) и платформы с вертикальными, предварительно натянутыми анкерными тросами, закрепленными на морском дне (TLP платформы). Системы удержания таких установок устойчивее, чем системы классического якорного позиционирования и намного проще и дешевле систем динамического позиционирования. Что касается устройств, предназначенных для связи плавающей платформы с морским дном, то здесь многие годы применяются колонны с верхним натяжением (TTR колонны).

TTR колонны являются объектами исследования при изменяемых интенсивностях и колебаниях волновых течений. Они снабжены натяжными устройствами сверху для удержания углов сверху и внизу

при воздействии окружающей среды. Натяжения, требуемые для производственных колонн, обычно меньше, чем для колонн бурения. Колонны часто объединяются в группу, смонтированную в прямоугольный или круглый массив. Сечения TTR колонн с верхним натяжением представлены на рисунке 2.

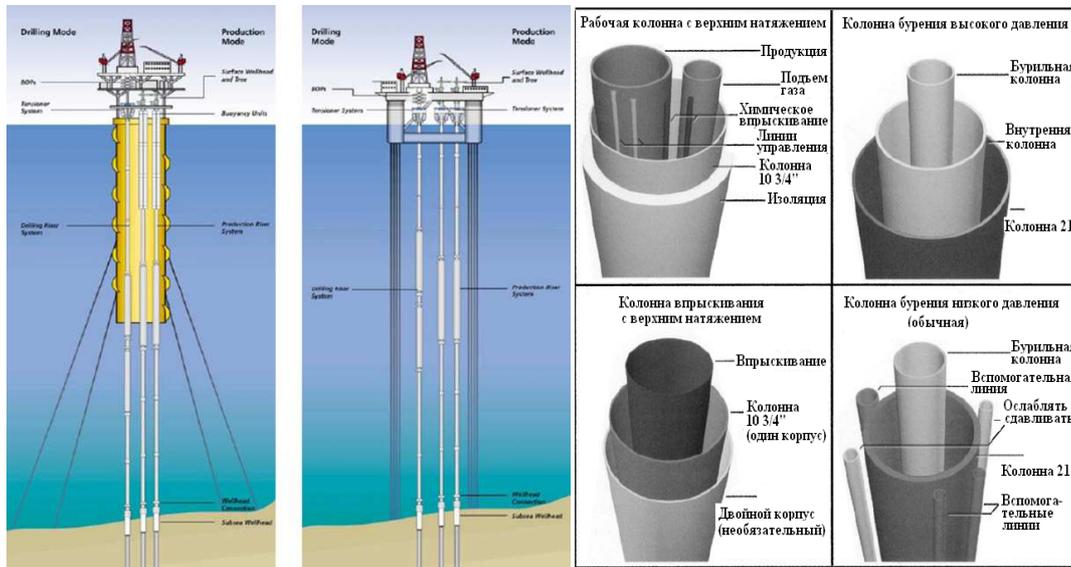


Рисунок 2 – Spar и TLP-платформы, оборудованные TTR-колоннами

Как показывает ряд исследований [1, 2], большие глубины приводят к увеличению гибкости и росту горизонтального смещения TTR колонн, связывающих месторождение на морском дне с платформой. Здесь также необходимо учитывать и смещение самой платформы. Указанные факторы могут привести к механическому взаимодействию между соседними колоннами, что, в свою очередь, приводит к вмятинам, повреждению их обшивки с усталостными и коррозионными последствиями. Во избежание таких поломок необходимо соответствующим образом управлять натяжением колонн, учитывая, что постоянное чрезмерное натяжение может привести к их быстрому износу [3].

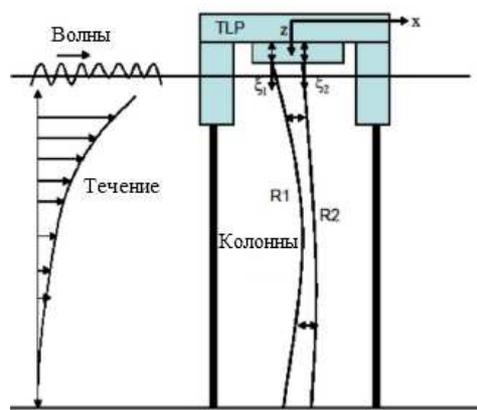


Рисунок 3 – Пример взаимодействия колонн в условиях внешних воздействий

Если расстояние между колоннами и их свойства поддерживаются постоянными, то риск столкновения будет увеличиваться с увеличением глубины воды. Так, например, статическое отклонение колонны (прогиб) благодаря однородному перемещению течения будет пропорционально квадрату длины колонны [2]. В глубоких водах это означает, что даже относительно малая разность статических сил может привести к механическому контакту.

При проектировании, как правило, рассматривают два параметра движения, которые используются для предотвращения столкновения между колоннами: изменение расстояния между колоннами и изменение верхнего натяжения колонн.

Типовой задачей управления является рассмотрение взаимодействия двух колонн, соединенных с TLP платформой через верхние узлы, которые должны контролировать горизонтальное движение платформы, не учитывая их вертикальное движение.

Уравнение динамики движения колонн имеет вид [1]

$$M(r)\ddot{r} + C(r)\dot{r} + K(r)r = f_{top} + f_{cur} - f_{TLP}, \quad (1)$$

где  $M(r)$ ,  $C(r)$ ,  $K(r)$  – матрицы массы, сопротивления и жесткости, соответственно;  $f_{TLP}$  – вектор силы, порожденной движением TLP платформы;  $f_{cur}$  – силы сопротивления, обусловленные течением и движением колонны;  $f_{top}$  – сила, порождаемая верхним натяжением. Вектор состояния  $r$ , характеризующий положение колонны имеет вид

$$r = [x_2 \ z_2 \ \dots \ x_i \ z_i \ \dots \ x_n \ z_n \ z_{n+1}]^T,$$

где  $x_i, z_i$ ,  $i = 2, \dots, n+1$  – координаты узлов, располагаемых вдоль колонны по горизонтали и вертикали, соответственно (рисунок 4). Координаты точки, зафиксированной на морском дне, не входят в вектор состояния системы (1). Кроме того, координата  $x_{n+1}$ , описывающая горизонтальное перемещение точки, зафиксированной на самой платформе, также исключена из вектора состояния и учитывается в векторе  $f_{TLP}$ .

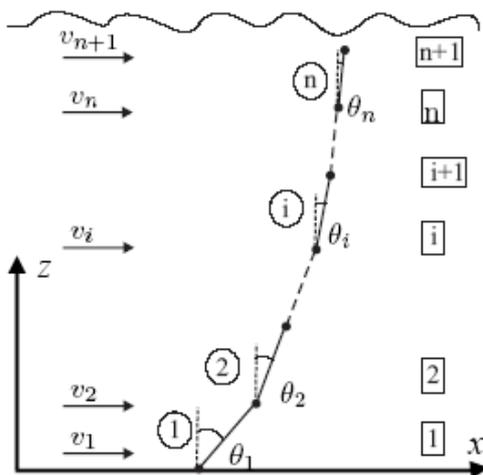


Рисунок 4 – Моделирование колонны элементами и узлами

На рисунке 4 приняты обозначения:  $v_i$  – скорость течения в каждом узле,  $\theta_i$  – угол наклона локального элемента колонны в  $i$ -м узле.

Матрица массы  $M(r)$  для каждого элемента определяется, основываясь на локальной системе координат. Локальная матрица массы состоит из трех слагаемых: структурная масса колонны  $m_s$ , масса внутренней жидкости  $m_f$  и гидродинамическая добавленная масса  $m_a$ .

Структурная масса задается в виде матрицы

$$m_{si} = \frac{\rho_s A l_i}{6} \begin{bmatrix} 2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 2 \end{bmatrix},$$

где  $\rho_s$  – плотность материала стальной колонны,  $A$  – площадь поперечного сечения колонны, и  $l_i$  – длина  $i$ -го элемента колонны. Масса внутренней жидкости определяется как

$$m_{fi} = \frac{\rho_f A_{int} l_i}{6} \begin{bmatrix} 2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 2 \end{bmatrix},$$

где  $A_{\text{int}}$  – внутренняя площадь колонны,  $\rho_f$  – плотность внутренней жидкости. Локальная добавленная масса в  $z$ -направлении предполагается равной нулю, в то время как добавленная масса для круглого цилиндра в  $x$ -направлении равна объему вытесняемой воды. В этом случае матрица для добавленной массы задается как

$$m_{ai} = \frac{\rho_w C_m A_e l_i}{6} \begin{bmatrix} 2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

где  $A_e$  – площадь, найденная из наружного диаметра, а  $\rho_w$  – плотность воды,  $C_m$  – коэффициент гидродинамической добавленной массы. Общая локальная матрица массы  $m_i$  для каждого элемента  $i$  в его собственной системе координат будет суммой трех членов:

$$m_i = m_{si} + m_{fi} + m_{ai}.$$

Каждая локальная матрица  $m_i$  преобразуется к глобальной системе координат ( $f$ -системе), фиксированной на морском дне, а все локальные матрицы массы собраны в форму глобальной матрицы массы  $M$  для колонны. Каждая локальная матрица массы преобразовывается к  $f$ -системе координат при помощи преобразования

$$\bar{m}_i = T_i^f m_i T_i^{fT} = \begin{bmatrix} -i & -i \\ m_{11} & m_{12} \\ -i & -i \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix},$$

где  $\bar{m}_i$  – матрица массы элемента  $i$  в глобальной  $f$ -системе координат.  $T_f^i$  является матрицей преобразования. Полная глобальная матрица массы в  $f$ -системе координат для  $n$  элементов тогда будет иметь вид

$$M = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ m_{11} & m_{12} & -2 & \dots & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -2 & \dots & 0 & 0 \\ m_{21} & m_{22} + m_{11} & m_{12} & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -2 & -2 & -3 & \vdots & \vdots \\ \dots & \dots & \dots & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & m_{22} + m_{11} & m_{12} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -n & -n \end{bmatrix}.$$

Глобальная матрица массы  $M$  всегда задается в  $f$ -системе координат и поэтому верхний индекс  $f$  при записи опускается. Размер глобальной матрицы будет  $2(n+1) \times 2(n+1)$ .

Локальная матрица жесткости содержит два элемента: жесткость изгиба  $k_E$  и геометрическую жесткость  $k_G$ . Матрица геометрической жесткости включает эффективное осевое натяжение  $P_i$ , действующее на отдельный элемент  $i$ . Матрица изгибной жесткости работает в осевом направлении, тогда как геометрическая жесткость в боковом направлении. Результирующая матрица жесткости  $k_i$  для элемента  $i$  в ее собственной системе координат имеет вид:

$$k_i = k_{E_i} + k_{G_i} = \frac{1}{l_i} \left( EA \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} + P_i \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \right),$$

где  $E$  – модуль упругости Юнга.

Чтобы вычислить глобальную матрицу жесткости для колонны, необходимо преобразовать каждую локальную матрицу жесткости из ее локальной  $i$ -системы координат к глобальной  $f$ -системе координат, подобно тому как это сделано с матрицей массы. Полная, глобальная матрица жесткости в  $f$ -системе координат для  $n$  элементов будет иметь вид

$$K = \begin{bmatrix} \bar{k}_{11}^{-1} & \bar{k}_{12}^{-1} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \bar{k}_{21}^{-1} & \bar{k}_{22}^{-1} + \bar{k}_{11}^{-2} & \bar{k}_{12}^{-2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \bar{k}_{21}^{-2} & \bar{k}_{22}^{-2} + \bar{k}_{11}^{-3} & 0 & \dots & \vdots \\ \dots & \dots & \dots & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \bar{k}_{22}^{-n-1} + \bar{k}_{11}^{-n} & \bar{k}_{12}^{-n} \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \bar{k}_{21}^{-n} & \bar{k}_{22}^{-n} \end{bmatrix}.$$

Демпфирование, испытываемое колонной, является комбинацией структурного и гидродинамического демпфирований. Структурное демпфирование возникает благодаря деформации и свойств упругости стали. Матрица демпфирования для натянутой стальной колонны основана на пропорциональном демпфировании Рейля и является пропорциональной глобальной матрице жесткости [4]  $C = \alpha_2 K$ .

Коэффициент пропорциональности  $\alpha_2$  может быть найден из уравнений, если общий уровень демпфирования известен на определенной частоте [4].

Исследование указанной системы предлагается вести от простого к сложному. Первым шагом при формировании стратегии управления является исследование поведения системы дифференциальных уравнений (1).

В работе [1] выполнен анализ статической модели движения TLP платформы, получаемой из соотношения (1), где не учитывается скорость движения колонн:

$$K(r)r = f_{top} + f_{cur} - f_{TLP}. \quad (2)$$

Модель статики (2) является достоверным инструментом для исследования лишь установившихся режимов движения колонн платформы. Она не учитывает динамических свойств системы, ее инерционность (что важно для массивных объектов), меняющиеся во времени воздействия внешней среды (морское волнение, ветер и т.п.). Если же говорить об исследовании неустановившихся переходных процессов, то здесь, безусловно, требуется рассмотрение и анализ уравнений динамики (1).

Методология полного исследования системы управления натяжением колонн платформы TLP схематически приведена на рисунке 5.

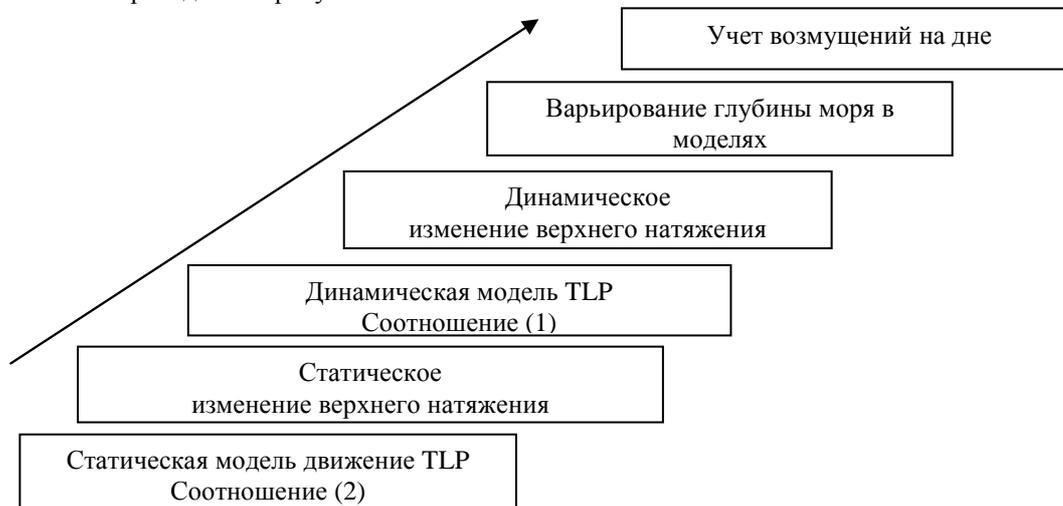


Рисунок 5 – Развитие исследования системы управления натяжением колонн платформы TLP

Авторами построена модель в пакете Matlab-Simulink, позволяющая проводить исследование динамики системы (1). Для моделирования движения платформы, обусловленного волнением моря, предлагается рассматривать полигармонические модели морской качки, полученные в работе [3]. Разработанная модель дает возможность конструировать эффективные алгоритмы управления натяжением колонн платформы, учитывающие различные факторы, в том числе отсутствие полной информации о параметрах исследуемой системы и координатах колонны  $x_i, z_i$ , что может рассматриваться как параметрическая неопределенность и, в результате, приводит к необходимости разработки законов робастного управления натяжением колонн TLP платформы.

Численный анализ динамического поведения колонн платформ TLP при варьировании управлений верхним натяжением является предметом дальнейших исследований.

**Библиографический список использованной литературы**

1. Asgeir J. Sørensen. Marine Control Systems. Propulsion and Motion Control of Ships and Ocean Structures / Sørensen J. Asgeir. — Department of Marine Technology Norwegian University of Science and Technology Report UK-12-76, 2012. — 535 p.
2. Ormberg H. Efficient analysis of mooring systems using de-coupled and coupled analysis / H. Ormberg, N. Sødahl, O. Steinkjer // Proceedings of the 17th International Conference Offshore Mechanics and Arctic Engineering, July 5-9, 1998, Lisbon, Portugal. — Paper No. OMAE98-0351.
3. Fossen I. Thor. Guidance and control of ocean vehicles / Thor. I. Fossen. — NY.: John Wiley & Sons Ltd., 1994. — 494 p.
4. Handbook on design and operation of flexible pipes. Handbook STF70 A92006 / S. Berge, A. Engseth, I. Fylling, C.M. Larsen, B.J. Leira and A. Olufsen. // Structural Engineering, SINTEF. — Trondheim, Norway, 1992. — 437 p.

*Поступила в редакцію 11.09.2013 г.*

**Крамарь В.О., Кабанов О.О., Татарков Д.Б. Методологія дослідження та проектування систем керування натягом колон платформ ТЛР на основі моделей динаміки**

Наводиться повна динамічна модель руху колон платформи ТЛР. Пропонується методика дослідження і проектування систем керування натягом колон.

**Ключові слова:** платформа ТЛР, колона ТТР, рівняння динаміки, взаємодія колон, управління натягом.

**Kramar V.A., Kabanov A.A., Tatarkov D.B. Methodology of research and design of TLP platform riser top tension control systems based on dynamic models**

A complete dynamic model of TLP platform riser's motion is given. The methods of the study and design of riser top tension control systems is provided.

**Keywords:** tension leg platform, top tensioned riser, the dynamic equation, the riser's interaction, tension control.