УДК 629.369

DOI 10.35211/1990-5297-2021-9-256-6-11

К. С. Артемьев, Е. С. Брискин

ОБ УПРАВЛЕНИИ ДВИЖЕНИЕМ ПОНТОНА-ЗАГЛУШКИ ПОДВОДНОЙ АВАРИЙНОЙ СКВАЖИНЫ*

Волгоградский государственный технический университет

dtm@vstu.ru

Рассматривается задача глушения подводных аварийных скважин углеводородов. Предложен метод глушения с использованием управляемых якорно-тросовых движителей, перемещающих устройство для глушения с небольшой положительной плавучестью. Составлена возможная последовательность операций для реализации глушения.

Ключевые слова: роботизированная подводная платформа, аварийные скважины, система глушения, управление, якорно-тросовый движитель.

K. S. Artemyev, E. S. Briskin

ON CONTROLLING OF THE PONTON-PLUG MOVEMENT OF SUBSEA EMERGENCY WELL

Volgograd State Technical University

This article deals with the problem of well shut-in underwater emergency hydrocarbon. A well shut-in method using controlled anchor-rope driver moving a plug pontoon with a small positive buoyancy is proposed. A possible sequence of operations for well shut-in is drawn up.

Keywords: robotic underwater platform, emergency wells, muting system, control, anchor-rope propulsion.

Введение

Одна из проблем, периодически возникающих при эксплуатации подводных месторождений углеводородов, состоит в необходимости аварийного глушения скважин [1, 2]. Решается эта проблема различными способами (в частности, методом бурения, методом ожидания и утяжеления и другими [3–5]).

Известно теоретическое описание якорно-тросовых движителей, способных перемещать платформу-понтон с небольшой положительной плавучестью в жидкой среде за счет ее согласованного подтягивания к якорям [6]. Эти движители допускают применение и для глушения аварийных скважин. Для этого необходимо, чтобы на дне, вокруг аварийной скважины, были расположены якоря, а понтон, изначально с положительной, но затем с управляе-

мой плавучестью был присоединен к якорям с помощью тросов управляемой длины.

Таким образом, если в исходном состоянии устройство для глушения находится на поверхности водоема в произвольной точке, то конечное его положение должно быть в месте его установки на аварийную скважину (рис. 1, 2).

Возможная последовательность операций для реализации глушения аварийной скважины может состоять из следующих этапов:

1) вокруг аварийной скважины сбрасываются на тросах грузы-якоря, к концам которых присоединены поплавки, плавающие на поверхности водоема;

2) тросы присоединяются к платформе-понтону через систему перемещающихся относительно тросов захватов в ту или иную сторону за счет работы привода их перемещения.

© Артемьев К. С., Брискин Е. С., 2021.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Волгоградской области в рамках научного проекта № 19-48-340018 p_a.

Направление и закон перемещения регулируются системой управления; свободный конец каждого троса находится на поверхности;

3) осуществляется согласованное движение захватов относительно тросов, что при неподвижных якорях вызывает перемещение понтона к аварийной скважине;

4) по мере движения робота-понтон к аварийной скважине осуществляется необходимое затопление емкостей с воздухом для снижения положительной плавучести, в конечном положении до естественной.

Альтернативный вариант перемещения по пункту 2 осуществляется за счет наматывания тросов на барабаны, установленные на платформе-понтоне. Это приводит к большим габаритам и весу, что может быть использовано для снижения усилия в тросах в процессе движения, и более надежному глушению скважины.

Еще один альтернативный вариант перемещения понтона-заглушки по пункту 2 осуществляется за счет намотки тросов на барабаны, установленные на вспомогательные плавающие средства (рис. 2).

Рис. 1. Перемещение устройства для глушения с положительной плавучестью:
1 – поверхность жидкости; 2 – понтон-заглушка; 3 – двигатель; 4 – поплавок; 5 – трос;
6 – водоем; 7 – якорь; 8 – аварийная скважина; 9 – поверхность дна;
A, B – исходное и промежуточное положение платформы-понтон

Особенность всех способов состоит в том, что при определенном соотношении между весом грузов-якорей и весом понтона (с учетом выталкивающей силы), с учетом режима работы привода, возможно осуществлять перенос грузов-якорей в новое положение, приближенное к жерлу аварийной скважины. Это положительно скажется на усилиях, развиваемых при-

водами изменения длины тросов.

Особенность программного движения понтона состоит в том, что он в процессе перемещения испытывает достаточно мощное возмущающее воздействие, препятствующее достижению жерла аварийной скважины, вызванное потоком жидкой и (или) газообразной добываемой углеводородной фракции.

Рис. 2. Перемещение устройства для глушения с положительной плавучестью:
1 – поверхность жидкости; 2 – понтон-заглушка; 3 – маховик; 4 – плавающее средство;
5 – трос; 6 – водоем; 7 – якорь; 8 – аварийная скважина; 9 – поверхность дна

Постановка задачи

Перемещение понтона как твердого тела описывается координатами его центра масс x_C , y_C , z_C и углами Эйлера ψ , θ , φ , характеризующими его ориентацию в пространстве. Поэтому допускается возможность разделения движения на два этапа. На первом этапе реализуется перемещение центра масс понтона из произвольного положения в положение, когда он находится на вертикальной оси, проходящей через жерло аварийной скважины. На втором этапе при поддержании допустимого положения центра масс осуществляется его перемещение вдоль вертикальной оси с необходимой ориентацией.

Изучается движение центра масс C устройства для глушения массы m , положение которого определяется как в декартовой системе координат (рис. 3) с началом в центре аварийной скважины (ось Oz направлена вдоль вертикальной оси), так и в сферической системе координат ρ , ε , φ . Положение N грузов-якорей задается координатами их местоположения на горизонтальном грунте B_j (x_{Bj} , y_{Bj} , 0) или в полярных координатах a_j , r_j . К центру масс устройства приложены силы натяжения тросов T_j , вертикальная сила P , являющаяся разницей между силой тяжести $G=mg$ и выталкивающей управляемой силой Φ , зависящей от положения понтона-заглушки. На понтон также действует сила F , обусловленная напором потока углеводо-

родного сырья, извергающегося из аварийной скважины.

Относительно силы F вводится гипотеза, что она действует вдоль прямой OC (рис. 3), а ее величина зависит от расстояния ρ от устья скважины до устройства для глушения и отклонения его центра масс ε от вертикальной оси

$$F = \frac{f_0 e^{-\frac{\varepsilon^2}{\chi}}}{\rho^2}, \quad (1)$$

где f_0 , χ – постоянные координаты.

Ставится задача определения программных законов изменения длин тросов l_j и соответствующих им усилий T_j , развиваемых каждым из приводов захватов тросов при заданном программном движении платформы-понтона и напряжений U_j , подаваемых на обмотки двигателей постоянного тока, приводящих в движение барабаны, на которые наматываются тросы.

Расчетная схема и математическая модель

Расчетная схема изучаемого процесса перемещения платформы-понтона представлена на рис. 3. В исходном положении центр масс платформы-понтона находится в точке с координатами x_{C0} , y_{C0} , z_{C0} , а в конечном положении $x_{C\kappa} = y_{C\kappa} = 0$; $z_{C\kappa} = d$.

В сферических координатах граничные условия имеют вид: при $t = 0$ $\rho = \rho_0$, $\varepsilon = \varepsilon_0$, $\varphi = \varphi_0$; при $t = \tau$ $\rho_{C\kappa} = d$, $\varepsilon_{C\kappa} = 0$.

Рис. 3. Расчетная схема:

l – возможная траектория центра масс устройства для глушения

Причем

$$\begin{cases} x_C = \rho \sin \varepsilon \cos \varphi, \\ y_C = \rho \sin \varepsilon \sin \varphi, \\ z_C = \rho \cos \varepsilon. \end{cases} \quad (2)$$

Задаются время перемещения центра масс

понтонa τ и законы программного движения, удовлетворяющие граничным условиям.

$$\rho = \rho(t), \varepsilon = \varepsilon(t), \varphi = \varphi(t). \quad (3)$$

Дифференциальные уравнения движения записываются в форме уравнений Лагранжа:

$$\begin{cases} m(\ddot{\rho} - \rho(\dot{\varepsilon}^2 + \dot{\varphi}^2 \sin^2 \varepsilon)) = F - P \cos \varepsilon + Q_\rho(T_1 \dots T_N), \\ m(\rho^2 \ddot{\varepsilon} + 2\rho \dot{\rho} \dot{\varepsilon} - \rho^2 \sin \varepsilon \cos \varepsilon \cdot \dot{\varphi}^2) = \rho \sin \varepsilon \cdot P + \rho Q_\varepsilon(T_1 \dots T_N), \\ m(\rho^2 \sin^2 \varepsilon \cdot \ddot{\varphi} + 2\rho \sin^2 \varepsilon \cdot \dot{\rho} \dot{\varphi} + \rho^2 \sin(2\varepsilon) \dot{\varphi} \dot{\varepsilon}) = \rho Q_\varphi(T_1 \dots T_N). \end{cases} \quad (4)$$

В уравнениях (4) Q_ρ , Q_ε , Q_φ – обобщенные силы, зависящие от всех сил натяжения тросов.

$$\begin{aligned} Q_\rho &= \sum_{j=1}^N \left(T_{jx} \frac{\partial x_C}{\partial \rho} + T_{jy} \frac{\partial y_C}{\partial \rho} + T_{jz} \frac{\partial z_C}{\partial \rho} \right), \\ Q_\varepsilon &= \sum_{j=1}^N \left(T_{jx} \frac{\partial x_C}{\partial \varepsilon} + T_{jy} \frac{\partial y_C}{\partial \varepsilon} + T_{jz} \frac{\partial z_C}{\partial \varepsilon} \right), \\ Q_\varphi &= \sum_{j=1}^N \left(T_{jx} \frac{\partial x_C}{\partial \varphi} + T_{jy} \frac{\partial y_C}{\partial \varphi} + T_{jz} \frac{\partial z_C}{\partial \varphi} \right), \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{где } T_{jx} = T_j \frac{x_{B_j} - x_C}{l_j}; T_{jy} = T_j \frac{y_{B_j} - y_C}{l_j};$$

$$T_{jz} = T_j \frac{z_{B_j} - z_C}{l_j}.$$

$$l_j = \sqrt{(x_{B_j} - x_C)^2 + (y_{B_j} - y_C)^2 + z_C^2}. \quad (6)$$

Особенность трех уравнений (4) с учетом (5), (6) состоит в том, что при заданных законах движения (3) они содержат N неизвестных усилий T_j . Подобные механические системы являются статически неопределимыми и только методами теоретической механики не могут быть изучены. Для их решения необходимо или рассматривать деформацию тех или иных элементов предложенной механической системы, или, для управляемых механических систем, учитывать динамические свойства приводов [7, 8]. Возможный вариант определения всех сил натяжения – выбор трех независимых усилий T_1 , T_2 , T_3 и задание требуемых соотношений между ними и остальными силами натяжения $T_4, \dots, T_N$ [6].

$$T_j = \sum \lambda_{ji} T_i, j = 4 \dots N, i = 1 \dots 3, \quad (7)$$

где λ_j – задаваемые произвольно коэффициенты, а возможно, и зависящие от времени функции.

В совокупности уравнения (3), (4), (6), (7) позволяют определить управляющие воздействия, приводящие к изменению длин тросов l_j .

Действительно, если, например, в приводах применяются двигатели постоянного тока, а трос

наматывается на маховик радиуса R_j (рис. 2), то закон вращательного движения $\psi_j(t)$ выходного элемента (маховика, ротора и др.) имеет вид:

$$J_j \ddot{\psi}_j = K_j U_j - \mu_j \dot{\psi}_j - T_j R_j, (j = 1 \dots N), \quad (8)$$

где J_j – приведенный к оси выходного элемента момент инерции; K_j , μ_j – приведенные параметры двигателя; U_j – управляющее напряжение.

Особенность уравнений (8) состоит в том, что углы ψ_j определяются изменением длины тросов l_j , которые в соответствии с (6) зависят от выбранного программного движения платформы понтона. Таким образом, при заданном программном движении (3) уравнения (4) и (7) позволяют определить все силы натяжения T_j .

Но тогда, имея ввиду, что

$$\psi_j = \frac{l_{j0} - l_j}{R}, \quad (9)$$

а l_j в соответствии с (2), (3), (6) зависят от $\rho = \rho(t)$; $\varepsilon = \varepsilon(t)$; $\varphi = \varphi(t)$, из уравнений (8) определяются напряжения U_j , подаваемые на якорную обмотку электродвигателя.

Модельная задача

Рассматривается движение центра масс устройства для глушения массой $m_0 = 8000$ кг. Воздействие потока углеводородного сырья на устройство описывается уравнением (1), в котором $f_0 = 10^6$ Н; $\chi = 0,4$. В начальный момент времени центр масс понтона имеет координаты $\rho_0 = 10$ м; $\varphi = 70^\circ$; $\varepsilon_0 = 15^\circ$. Используются пять грузов-якорей, которые расположены на горизонтальной поверхности грунта $z = 0$ (рис. 4). Программное движение, в соответствии с (3), задается уравнениями

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \varepsilon_0 - \frac{\varepsilon_0}{\tau} t, \\ \varphi &= \varphi_0 = \text{const}, \\ \rho &= \rho_0 - \frac{\rho_0 - d}{\tau} t. \end{aligned} \quad (10)$$

Такое движение соответствует представлению о перемещении центра масс понтона за время τ из точки C в точку с координатами $x_C = y_C = 0$; $z_C = d$ или $\rho_K = d$; $\varepsilon_K = 0$ при $t = \tau = 10$ с.

Задаваемые коэффициенты λ_{ji} в уравнениях (7) в рассматриваемой модельной задаче соответственно равны

$$\begin{aligned} \lambda_{41} = 0,3 \quad \lambda_{42} = 0,7 \quad \lambda_{43} = 0 \\ \lambda_{51} = 0 \quad \lambda_{52} = 0,6 \quad \lambda_{53} = 0,3 \end{aligned} \quad (11)$$

В общем случае они подлежат определению при решении оптимизационной задачи, например, обеспечивающих минимум для максимальной силы натяжения наиболее нагруженного троса. Зависеть это будет от расположения сброшенных грузов-якорей (рис. 4).

Результаты расчетов сил натяжения тросов при $d = 2$ м приведены на 5.

Необходимая длина троса l_j от якоря до точки подвеса определяется координатами текущей точки траектории из геометрических соотношений.

Рис. 4. Схема расположения якорей и устройства для глушения:
 A – устройство для глушения; $1 - r_1 = 6,3$ м, $\theta_1 = 40^\circ$; $2 - r_2 = 6$ м, $\theta_2 = 155^\circ$;
 $3 - r_3 = 5,5$ м, $\theta_3 = 300^\circ$; $4 - r_4 = 6,2$ м, $\theta_4 = 250^\circ$; $5 - r_5 = 5$ м, $\theta_5 = 85^\circ$

Рис. 5. Сила натяжения тросов при постоянной массе m ($N=5$):
 $1 - T_1$; $2 - T_2$; $3 - T_3$; $4 - T_4$; $5 - T_5$

Рис. 6. Программное изменение длины тросов:
1 – l_1 ; 2 – l_2 ; 3 – l_3 ; 4 – l_4 ; 5 – l_5

На основе уравнения (6) получены зависимости длины троса от времени (рис. 6).

Выводы

1. Предложен метод глушения подводных аварийных скважин за счет использования управляемых тросовых движителей, программно перемещающих устройство для глушения с поверхности водоема к устью скважины.

2. Разработана математическая модель движения центра масс предложенной механической системы, позволяющая определять законы изменения длин тросов и развивающихся в них усилиях.

3. Математическая модель нуждается в развитии в областях:

- уточнения характера силы, действующей на понтон со стороны потока, извергающегося из аварийной скважины углеводородного сырья;

- установления критериев оптимального перераспределения усилий на основе важности тех или иных показателей и на этой основе – разработки методов оптимизации;

- исследования устойчивости программного режима движения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Журавель, В. И. Аварийность на морских скважинах. Современное состояние количественной оценки рисков возможных выбросов / В. И. Журавель, И. В. Журавель // Oiland Gas Journal Russia. – 2013. – № 12.
2. Марков, О. В. Подводное противовыбросовое оборудование и особенности управления скважиной на море : Учебное пособие / О. А. Марков, В. М. Подгорнов, В. И. Исаев. – М. : РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2009. – 94 с.
3. Большой справочник инженера нефтегазодобычи. Бурение и заканчивание скважин : пер. с англ. / под ред. У. Лайонза, Г. Плизга. – СПб. : Профессия, 2009. – 628 с.
4. Басарыгин, Ю. М. Заканчивание скважин : учеб. пособие. – М. : Недра, 2000. – 670 с.
5. Калинин, А. Г. Бурение нефтяных и газовых скважин : Учебник / А. Г. Калинин. – М. : ЦентрЛитНефтеГаз, 2008. – 848 с. – (Золотой фонд Российской нефтегазовой литературы).
6. Управление движением подводного мобильного робота с якорно-тросовыми движителями / Е. С. Брискин, Н. Г. Шаронов, В. А. Серов, И. С. Пеньшин // Робототехника и техническая кибернетика. – 2018. – № 2 (19). – С. 39–45.
7. Брискин, Е. С. Об управлении движением механических систем с избыточным числом управляющих воздействий / Е. С. Брискин, Н. Г. Шаронов // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2019. – № 3. – С. 48–54.
8. Брискин, Е. С. О математическом моделировании управления движением твердого тела с избыточным числом тросовых движителей / Е. С. Брискин, В. Н. Платонов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2019. – Т. 20, № 7. – С. 422–427.