

Д. А. Разумов, Е. С. Брискин

**ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОНТОНА-ЗАГЛУШКИ
АВАРИЙНОЙ СКВАЖИНЫ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
С НАБЕГАЮЩИМ ПОТОКОМ ЖИДКОСТИ КАК ТВЕРДОГО ТЕЛА***

Волгоградский государственный технический университет

razumoff.dmitriy@yandex.ru, dtm@vstu.ru

Рассматривается задача определения усилий, действующих на твердое тело в водной среде со стороны потока жидкости. Решение поставленной задачи необходимо для изучения управляемого движения понтона-заглушки на устье аварийной скважины углеводородов. Разработана экспериментальная установка, позволяющая определить усилие, действующее на осесимметричное твердое тело, имитирующие заглушку в зависимости от его расположения относительно скважины. Установлена аналитическая зависимость величин усилия от расстояния между заглушкой и скважиной и ее угловым положением относительно оси скважины.

Ключевые слова: аварийная скважина углеводородов, глушение, заглушка, усилие, якорно-тросовые движители.

D. A. Razumov, E. S. Briskin

**ON THE FEATURES OF THE INTERACTION OF THE PONTOON PLUG
OF THE EMERGENCY WELL OF THE ROBOTIC SYSTEM
WITH THE INCIDENTAL FLOW OF LIQUID AS A SOLID BODY**

Volgograd State Technical University

The problem of determining the forces acting on a solid body in an aqueous medium from a liquid flow is considered. The solution to the problem is necessary for studying the controlled movement of a pontoon plug at the mouth of an emergency hydrocarbon well. An experimental device has been developed that makes it possible to determine the force acting on an axisymmetric rigid body depending on its location relative to the well. An analytical dependence of the force values on the distance between the plug and the well and its angular position relative to the axis of the well has been established.

Keywords: emergency well of hydrocarbons, jamming, plug, force, anchor-rope propellers.

© Разумов Д. А., Брискин Е. С., 2025.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-21-00477, <https://rscf.ru/project/24-21-00477/>

Введение

В настоящее время одна из характерных особенностей при добыче нефтепродуктов состоит в разработке подводных месторождений углеводородов. Одновременно возникает необходимость в разработке методов аварийного глушения скважин [1, 2]. Эта проблема решается различными способами [3–5], в частности, методом установки заглушки на ее устье с помощью якорно-тросовых движителей [6]. Якорно-тросовые движители рассматривались при изучении движения роботов-понтонных с небольшой положительной плавучестью при перемещении по дну водоема [7–10]. Однако для корректного расчета мест установки якорей и их количества, усилий, развиваемых приводами изменения длины тросов, изучения устойчивости движения перемещаемой заглушки необходимо установить зависимость усилия, действующего на заглушку со стороны струи углеводородов, как от взаимного расположения устья скважины и заглушки как твердого тела, так и от расхода извергаемых жидких углеводородов из аварийной скважины.

Выбор расчетной схемы, постановка задачи

Рассматривается движение твердого тела в жидкости как материальной точки M массы m , подвешенной на тросе к неподвижной точке O . На материальную точку, помимо силы тяжести mg , действует достаточно интенсивный поток жидкости с силой F , источник которой точка A

несоосно расположена по отношению к точке O . Учитывается, что вектор силы F , направлен вдоль AM (рис. 1).

Ставятся задачи определения зависимости усилий F , действующих на рассматриваемую точку от ее положения относительно источника потока жидкости точки A (величины несоосности c , глубины устья скважины h , длины троса l) и массы m точки. Учитывать такое воздействие необходимо для построения системы автоматического управления движением заглушки в реальных условиях.

Математическая модель

Составляются дифференциальные уравнения движения в естественной форме в проекциях на касательную τ и нормальную n оси.

$$\begin{cases} ml\ddot{\alpha} = F \cos(\beta - \alpha) - mg \sin \alpha \\ ml\dot{\alpha}^2 = T - mg \cos \alpha + F \sin(\beta - \alpha) \end{cases} \quad (1)$$

где T – усилие в тросе OM , α и β – углы, характеризующие положение точки M относительно точки подвеса O и источника струи A .

Углы α и β связаны соотношением:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{h - l \cos \alpha}{c + l \sin \alpha}. \quad (2)$$

При малой величине несоосности c и угла отклонения α с учетом линеаризации первое уравнение системы (1) преобразуется:

$$ml\ddot{\alpha} + (mg - \frac{hF}{h-l})\alpha = \frac{cF}{h-l}; \quad (3)$$

или

$$\ddot{\alpha} + k^2\alpha - p^2\alpha = qp^2; \quad (4)$$

$$\text{где } n = \frac{\mu}{2m}; k^2 = \frac{g}{l}; p^2 = \frac{hF}{(h-l)lm}; q = \frac{c}{h}.$$

Анализ уравнения (4) показывает, что в условиях малости углов α оно может описывать два режима движения: гармонические колебания при $k^2 > p^2$ и монотонное движение с возрастающей координатой α при $k^2 < p^2$. Такое явление подобно явлению дивергенции [11].

Однако в случае колебаний его центр смещается на величину:

$$\alpha_* = \frac{qp^2}{k^2 - p^2}. \quad (5)$$

Откуда при экспериментально определенной величине α_* можно получить величину для оценки силы F , действующей со стороны струи жидкости на материальную точку:

$$F = \frac{h-l}{h} \frac{\alpha_*}{q + \alpha_*} mg. \quad (6)$$

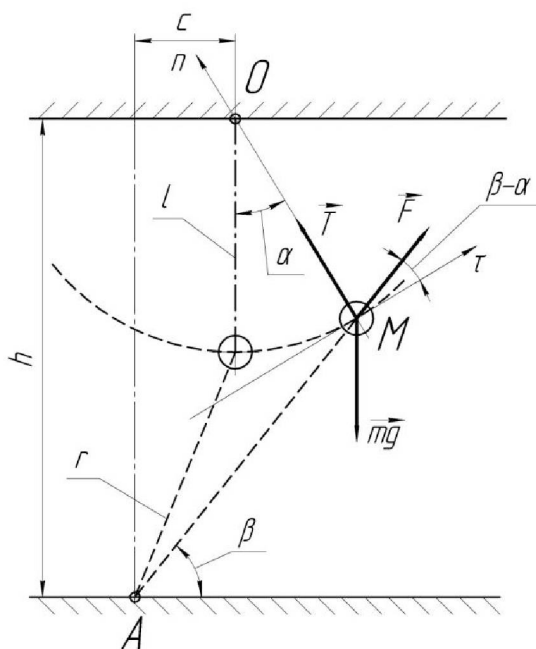


Рис. 1. Расчетная схема

С другой стороны, действие струи F оценивается и по изменению частоты колебаний. Действительно, из уравнения (4) следует, что частота наблюдаемых колебаний k_* определяется выражением:

$$k_* = \sqrt{k^2 - p^2}, \quad (7)$$

откуда для усилия F можно получить:

$$F = \frac{h-l}{h} ml \sqrt{\frac{g}{l} - k_*^2}. \quad (8)$$

Получившиеся выражения (6) и (8) позволяют определить разыскиваемые параметры P_0 и χ в предполагаемой зависимости усилия, действующего на твердое тело со стороны струи жидкости. [12]

$$F = \frac{P_0}{r^2} e^{-\chi c}. \quad (9)$$

Действительно, в отсутствии несоосности при $c = 0$ из (8) следует:

$$P_0 = \frac{mlr^3}{h} \left[\frac{g}{l} - k_*^2 \right]. \quad (10)$$

Тогда (6) для χ имеет место формула:

$$\chi = -\frac{1}{c} \ln \frac{\alpha_*}{q + \alpha_*} \frac{r^3}{hP_0}. \quad (11)$$

Таким образом, при известных параметрах l, r, h, m, c формулы (10) и (11) позволяют в результате экспериментальных исследований определить P_0 и χ .

Описание лабораторной установки и методика экспериментальных исследований

Разработанная лабораторная установка (рис. 2) включает:

1. Емкость-водоем с плоскими боковыми поверхностями, заполненная водой;
2. Борт, состоящий из двух пластиковых панелей, скрепленных между собой болтовым соединением на стенке емкости. На борте наносится координатная сетка (с шагом 20 мм) для отслеживания движения маятника;
3. Маятник, состоящий из твердого тела цилиндрической формы, имеющий возможность скользить по боковой поверхности емкости, для обеспечения движения в вертикальной плоскости. Маятник крепится на оси к тонкому стержню AB длиной l , другой конец которого закреплен шарнирно в точке O на борту емкости с возможностью перемещаться по горизонтальной оси;
4. Шланг, из которого вертикально вверх извергается жидкость. Давление жидкости создается насосом;

5. Опору для установки емкости-водоема.

Внутри емкости-водоема пропускается и крепится шланг, подключенный к насосу. Маятник крепится в точке O шарнирно, с возможностью перемещаться по горизонтали, а также изменять длину l стержня AB . Емкость заполняется водой, допускается перелив воды через емкость. Затем через шланг подается напор воды под давлением. Поток жидкости воздействует на маятник, тем самым заставляя его колебаться. Эксперимент с момента подачи давления записывается на видеокамеру с возможностью замедленной съемки. Уже на видеозаписи в замедленном режиме можно точно определить угол отклонения маятника α , для этого в масштабе прочерчивается экспериментальная установка, наносится координатная сетка, после чего графическим методом определяются углы отклонения. Для определения положения маятника на него наносится метка-маркер, он находится в центре масс груза. Для проведения эксперимента требуется изменять варьируемые величины, в нашем случае это l – длина стержня AB , а также c – величина несоосности точки O относительно точки извержения жидкости.

На графике (рис. 3) представлена характерная зависимость изменения угла α от времени t при длине троса маятника $l = 0,235$ м, величине несоосности $c = 0,016$ м, массе $m = 0,061$ кг, глубины емкости $h = 0,375$ м. Поддерживается постоянный расход истечения жидкости.

Точками отмечены экспериментально полученные значения α_n , а сплошной линией – аппроксимированная кривая в соответствии с приближением одной гармонической ряда Фурье.

Обработка экспериментальных результатов показала, что среднеквадратичное относительное отклонение σ теоретических полученных значений угла $\alpha(t)$ от экспериментально полученных данных α_i

$$\sigma = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^{N_i} \left[\frac{\alpha(t_i) - \alpha_i}{\alpha_i} \right]^2}, \quad (12)$$

составляет 11 %.

Тогда в результате серии экспериментов определяются в соответствии с (10) и (11) P_0 и χ , которые затем должны быть использованы при расчете усилия F (9), действующего на твердое тело при разработке робототехнической системы управления перемещением понтона-заглушки.

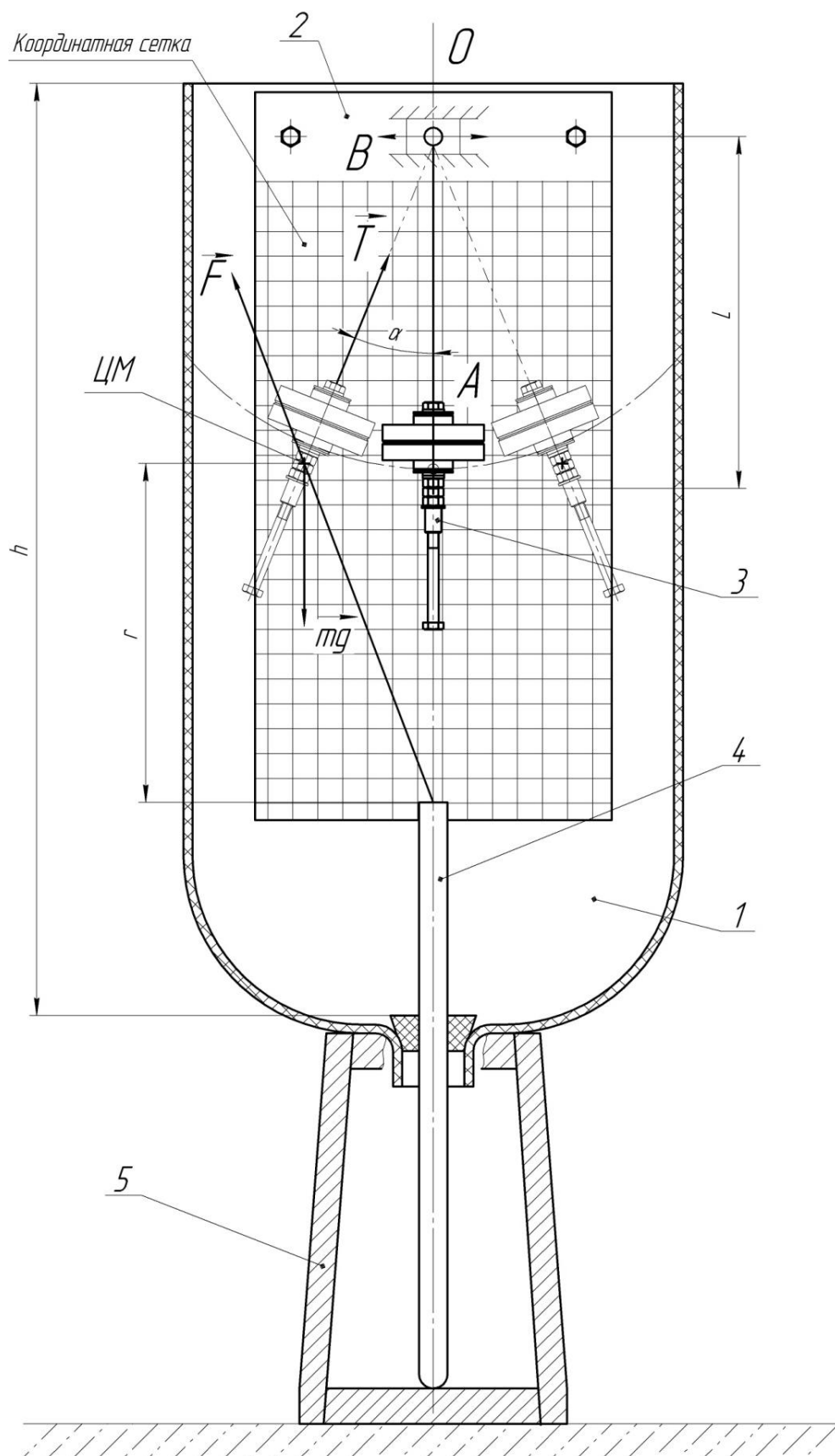


Рис. 2. Схема лабораторной установки:

1 – емкость-водоем; 2 – борт; 3 – маятник; 4 – шланг для подачи воды; 5 – опора

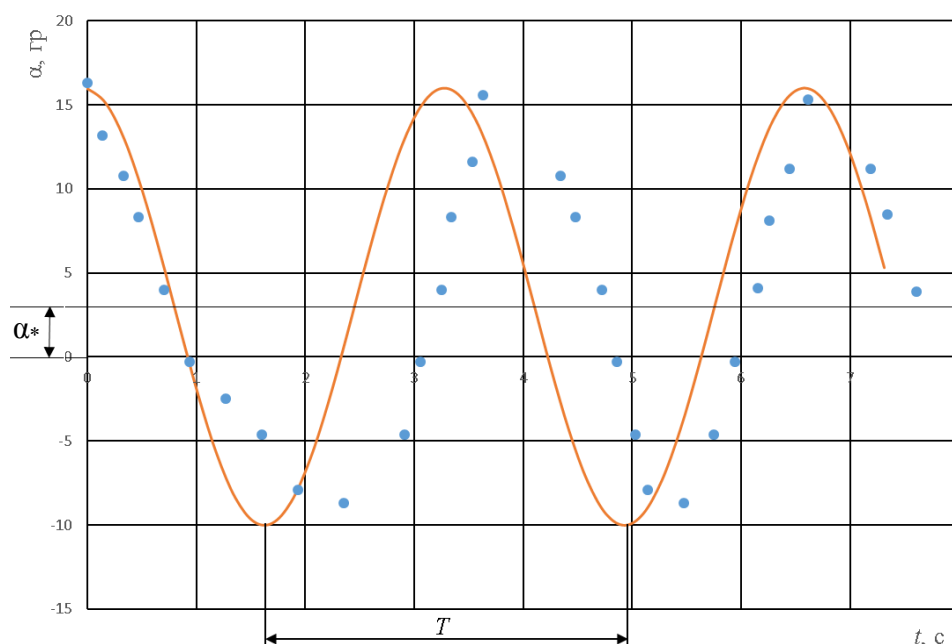


Рис. 3. График зависимости изменения угла от времени при $c = 0,016$ м и $l = 0,235$ м:

α_* — смещение центра колебаний; $T = \frac{2\pi}{k_2}$ — период колебаний

Выводы

1. Экспериментально подтверждена закономерность развиваемого усилия, действующего на твердое тело со стороны струи жидкости в зависимости от взаимного расположения источника струи и находящегося в жидкости твердого тела.

2. Установленная закономерность должна быть учтена при разработке системы управления движением твердого тела в жидкости для его точного позиционирования на дне водоема.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Журавель, В. И. Аварийность на морских скважинах. Современное состояние количественной оценки рисков возможных выбросов / В. И. Журавель, И. В. Журавель // Oil and Gas Journal Russia. — 2013. — № 12.
2. Марков, О. В. Подводное противовыбросное оборудование и особенности управления скважиной на море: учеб. пособие / О. И. 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 закачивание скважин: пер. с англ. / под ред. У. Лайонза, Г. Плизга. — СПб.: Профессия, 2009. — 628 с.
4. Басарыгин, Ю. М. Заканчивание скважин: учеб. пособие / Ю. М. Басаргин, А. И. Булатов, Ю. М. Проселков. — М.: Недра, 2000. — 670 с.
5. Калинин, А. Г. Бурение нефтяных и газовых скважин: учебник / А. Г. Калинин. — М.: ЦентрЛит Нефтегаз, 2008. — 848 с.
6. Артемьев, К. С. Об управлении движением понтона-заглушки подводной аварийной скважины / К. С. Ар-

темьев, Е. С. Брискин // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 9 (256) / ВолгГТУ. — Волгоград, 2021. — С. 6–11.

7. Брискин, Е. С. Определение усилий в движителях якорно-тросового типа / Е. С. Брискин, И. С. Пеньшин, Л. Д. Смирная, Н. Г. Шаронов // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 14 (209) / ВолгГТУ. — Волгоград, 2017. — С. 87–90.

8. Пеньшин, И. С. Об управлении роботов-понтонных с якорно-тросовыми движителями / И. С. Пеньшин, Е. С. Брискин // XVI Всероссийская конференция по проблемам управления (МКПУ-2023): материалы конференции. В 4-х томах, Волгоград, 11–15 сентября 2023 года. Том 1. — Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2023. — С. 201–203.

9. Гулевский, В. В. Управление ориентацией гусеничной цепи мобильных роботов с якорно-тросовыми гусеничными движителями / В. В. Гулевский, Е. С. Брискин // XVI Всероссийская конференция по проблемам управления (МКПУ-2023): Материалы конференции. В 4-х томах, Волгоград, 11–15 сентября 2023 года. Том 1. — Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2023. — С. 145–148.

10. Брискин, Е. С. 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.

11. Пановко, Я. Г. Основы прикладной теории колебаний и удара / Я. Г. Пановко. — Ленинград: Машиностроение, 1976. — 320 с.

12. Разумов, Д. А. О методике экспериментальных исследований особенностей взаимодействия понтона-заглушки с набегающим потоком жидкости / Д. А. Разумов // Известия Волгоградского государственного технического университета. — 2024. — № 9 (292). — С. 67–70.