

Технология установки подводного массивного резервуара на морское дно

Ч.С. Гусейнов^{1,2*}, В.А. Земляновский^{1**}

1 – РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, г. Москва

2 – Институт проблем нефти и газа РАН, г. Москва

E-mail: *guseinov2@yandex.ru, **vadim200007@mail.ru

Аннотация. В данной работе предпринята попытка определить закон движения резервуара как крупного объемного массивного сооружения при погружении в сопротивляющуюся жидкую среду. Авторами предложены две методики его определения. Построены графики зависимости координаты, скорости, ускорения резервуара от времени. Определена зависимость времени и скорости спуска массивного хранилища от объема закачанной воды, при этом определен диапазон оптимального объема воды, закачиваемой внутрь резервуара, с целью его мягкой посадки.

Ключевые слова: погружение резервуара, закон движения, подводный резервуар, сопротивляющаяся жидкая среда.

Для цитирования: Гусейнов Ч.С., Земляновский В.А. Технология установки подводного массивного резервуара на морское дно // Актуальные проблемы нефти и газа. 2021. Вып. 2(33). С. 38–51. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2021-33.art4>

Введение

Погружение и установка на морском дне крупных резервуаров-хранилищ – это один из самых трудоемких этапов при работах на шельфе.

Преимуществом расположения емкости на дне, в сравнении с надводными сооружениями, является отсутствие воздействия льда и нахождение резервуара в неизменных, достаточно комфортных, температурных условиях. Ранее эти обстоятельства уже рассматривались более подробно и доказательно [1–3].

Перемещение резервуара осложняется воздействием динамических нагрузок – волн, подводных течений и силы сопротивления воды, которые создают дополнительные сложности при погружении и установке емкости в проектное положение,

а большие скорости при неконтролируемом спуске могут привести к разрушению конструкции.

В процессе погружения тела в воду на него действует сила трения со стороны внешней среды.

Взаимодействие происходит только с непосредственно соприкасающимся с резервуаром слоем, который принято называть пограничным.

Первая методика

Первая методика определения закона движения резервуара при погружении в сопротивляющуюся жидкую среду основывается на принятии силы сопротивления $\vec{F}_{\text{тр}}$ среды прямо пропорциональной скорости тела \vec{v} :

$$\vec{F}_{\text{тр}} = -k\vec{v} = -\eta S\vec{v},$$

где:

k – коэффициент сопротивления среды, Па·с·м²;

η – вязкость среды, Па·с;

S – площадь поверхности, соприкасающейся с водой, м².

Согласно второму закону Ньютона, изменение импульса тела равно сумме сил, действующих на тело [4, 5]:

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = m\vec{g} + \vec{F}_A + \vec{F}_{\text{тр}} = m\vec{g} - V_T \cdot \rho_B \cdot \vec{g} - \eta\pi R^2 \vec{v}.$$

Движение тела является одномерным, поэтому ось координат OY направим по направлению движения (т.е. вертикально вниз) и совместим начало координат с положением тела в начальный момент времени (рис. 1).

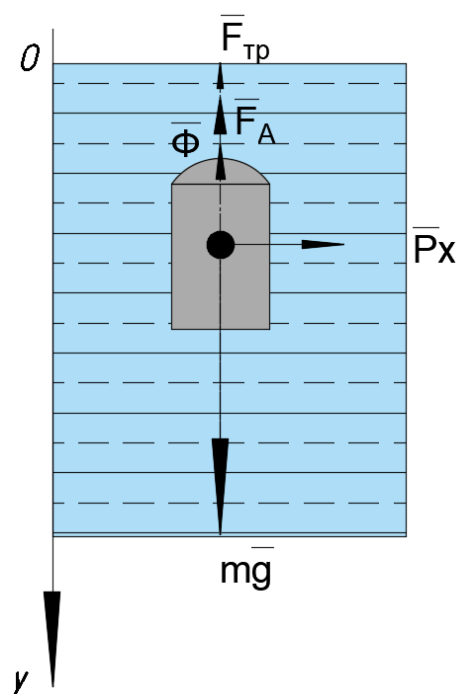


Рис. 1. Силы, приложенные к телу

Рассмотрим плавное погружение без начальной скорости тела резервуара. На тело действуют следующие силы:

– сила тяжести $m\vec{g}$,

– сила Архимеда $\vec{F}_A = -V_T \cdot \rho_B \cdot \vec{g}$,

– сила сопротивления среды $\vec{F}_{\text{тр}} = -\eta\pi R^2 \vec{v}$,

– сила инерции массы погружающегося тела $\vec{\Phi} = -m\vec{a}$.

Тогда, в проекции на ось OY, второй закон Ньютона примет вид:

$$m \frac{dv}{dt} = mg - V_T \cdot \rho_B \cdot g - \eta\pi R^2 v.$$

Объем резервуара:

$$V_T = V_{\text{шарового сегмента}} + V_{\text{цилиндра}};$$

$$V_{\text{цилиндра}} = \pi R^2 H;$$

$$R_{\text{сф}} = \frac{R^2 + h^2}{2h};$$

$$V_{\text{шарового сегмента}} = \pi h^2 \left(\frac{R^2 + h^2}{2h} - \frac{h}{3} \right);$$

$$V_T = \pi R^2 H + \pi h^2 \left(\frac{3R^2 + h^2}{6h} \right).$$

Вышеизложенные обозначения отображены на рис. 2.

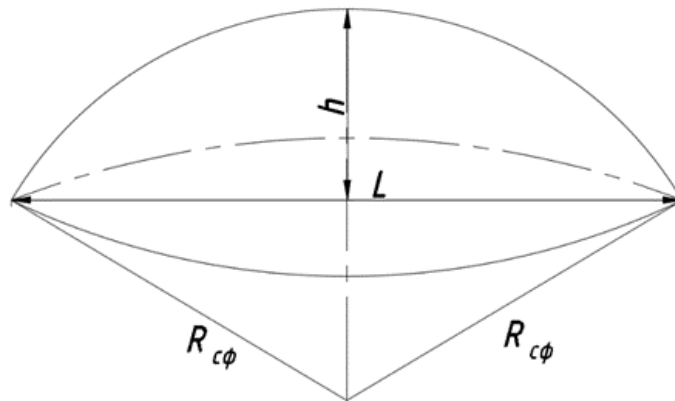


Рис. 2. Схема крыши резервуара

Приведем уравнение к следующему виду:

$$\frac{dv}{dt} = g - V_T \cdot \frac{\rho_B}{\rho_T} \cdot g - \frac{\eta \pi R^2 v}{V_T \cdot \rho_T};$$

$$\frac{dv}{dt} = \left(1 - \frac{\rho_B}{\rho_T}\right) \cdot g - \frac{\eta \pi R^2}{\left[\pi R^2 H + \pi h^2 \left(\frac{3R^2 + h^2}{6h}\right)\right] \cdot \rho_T} v.$$

Помножив уравнение на

$$-\frac{\left[R^2 H + h^2 \left(\frac{3R^2 + h^2}{6h}\right)\right] \cdot \rho_T}{\eta R^2},$$

получим:

$$-\frac{\left[R^2 H + h^2 \left(\frac{3R^2 + h^2}{6h}\right)\right] \cdot \rho_T}{\eta R^2} \frac{dv}{dt} = v - \frac{\left[R^2 H + h^2 \left(\frac{3R^2 + h^2}{6h}\right)\right] \cdot \rho_T}{\eta R^2} \left(1 - \frac{\rho_B}{\rho_T}\right) \cdot g.$$

Совершим замену переменных:

$$u = v - \frac{\left[R^2 H + h^2 \left(\frac{3R^2 + h^2}{6h}\right)\right] \cdot \rho_T}{\eta R^2} \left(1 - \frac{\rho_B}{\rho_T}\right) \cdot g$$

и введем обозначения:

$$\tau = \frac{\left[R^2 H + h^2 \left(\frac{3R^2 + h^2}{6h}\right)\right] \cdot \rho_T}{\eta R^2}; \quad U = \left(1 - \frac{\rho_B}{\rho_T}\right) \cdot g \cdot \tau.$$

Следовательно:

$$u(t) = v(t) - U; \quad (1)$$

$$du = dv.$$

Дифференциальное уравнение примет вид:

$$-\tau \cdot \frac{dv}{dt} = u;$$

$$\int_0^t \frac{du}{u} = - \int_0^t \frac{dt}{\tau}.$$

Проинтегрировав, получим:

$$\ln \frac{u(t)}{u(0)} = - \frac{t}{\tau};$$

$$u(t) = u(0)e^{-t/\tau}.$$

Учитывая (1),

$$u(0) = v(0) - U$$

и получим:

$$u(t) = (v(0) - U)e^{-t/\tau};$$

$$v(t) - U = (v(0) - U)e^{-t/\tau}.$$

Примем начальные условия:

$$v(0) = 0; \quad y(0) = 0.$$

Тогда:

$$v(t) = U \left(1 - e^{-t/\tau}\right).$$

Чтобы найти зависимость координаты тела от времени, проинтегрируем полученное выражение *по времени*, учитывая при этом, что начальные условия авторами ранее уже были приняты равными нулю:

$$\int_0^t v(t) dt = U \int_0^t (1 - e^{-t/\tau}) dt;$$

$$x(t) = Ut - U\tau (1 - e^{-t/\tau}).$$

Продифференцировав зависимость скорости от времени, получим зависимость ускорения от времени:

$$a(t) = \frac{U}{\tau} e^{-t/\tau},$$

где:

τ – время установки резервуара на морское дно;

U – предельная скорость, с которой можно опускать резервуар в данной среде.

Если период установления достаточно мал, то, спустя какое-то время, тело начнет двигаться в жидкости с постоянной скоростью, то есть равномерно.

Для построения графиков зависимости характеристик движения тела от времени необходимо найти τ и U .

Поэтому нужно определить массогабаритные характеристики хранилища.

Определение массогабаритных характеристик подводного резервуара

Ориентируясь на равную 172,6 тыс. м³ [6] вместимость грузовых танков ледового класса Arc 7, предназначенных для перевозки сжиженного природного газа (СПГ) в регионах с суровыми климатическими условиями, назначим дедвейт подводного хранилища близким к 60 000 м³. Таким малым дедвейтом авторы вынуждены ограничиться в связи с небольшими глубинами. Общий вид резервуара отображен на рис. 3.

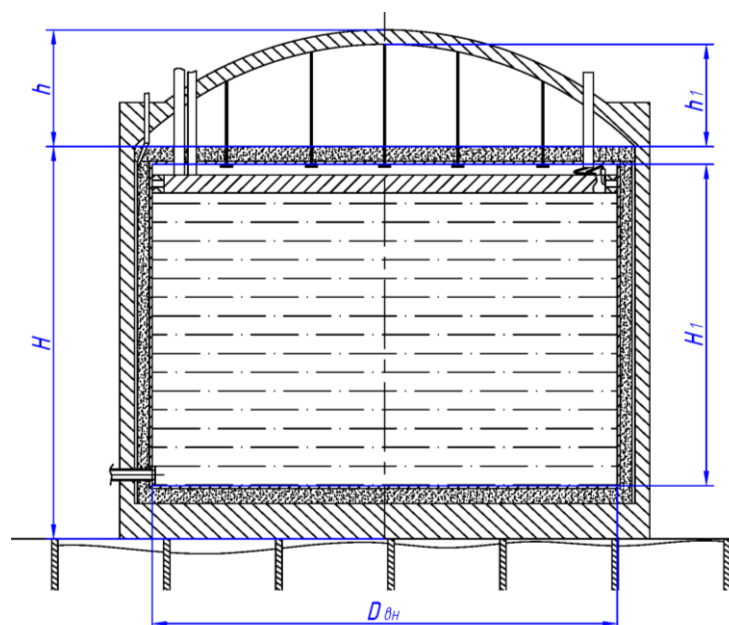


Рис. 3. Общий вид исследуемого подводного резервуара

Будем использовать следующие исходные данные [7]:

$$R_{вн} = 26 \text{ м};$$

$$H_I = 28 \text{ м};$$

$$h_I = 3 \text{ м};$$

Глубина воды = 100 м.

Для определения плотности всего резервуара вычислим его объем:

$$\rho_T = \frac{M}{V_{РЕЗ}},$$

где:

M – масса резервуара, кг;

$V_{РЕЗ}$ – объем резервуара, м³.

$$V_{РЕЗ} = V_p + V_{Конструкции};$$

$$V_{Конструкции} = S_{12Х18Н10Т} \cdot \delta_{12Х18Н10Т} + S_{К-FLEX ST} \cdot \delta_{ИЗ} + S_{Полиур.пена} \cdot \delta_{Пена} + S_{ЖБ} \cdot \delta_{ЖБ} + S_{Ст} \cdot \delta_{Ст} \approx 7132 \text{ м}^3;$$

$$V_{РЕЗ} = 59462 + 7132 = 66\,594 \text{ м}^3;$$

$$\rho_T = \frac{M}{V_{РЕЗ}} = \frac{73\,190 \cdot 10^3}{66\,594} = 1099 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Динамическая вязкость воды при $t = 0 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$\eta = \frac{1}{562 + 17t + 0,2t^2 - 0,00093t^3 + 0,00000016t^4} = 0,00178 \text{ Па} \cdot \text{с};$$

$$\tau = \frac{\left[R^2 H + h^2 \left(\frac{3R^2 + h^2}{6h} \right) \right] \cdot \rho_T}{\eta R^2} = 1,9 \cdot 10^7 \text{ с};$$

$$U = \left(1 - \frac{\rho_B}{\rho_T} \right) \cdot g \cdot \tau = 1,68 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

На основе полученного закона построим графики зависимости координаты, скорости и ускорения

резервуара от времени, исходя из зависимостей, полученных по первому методу (рис. 4–6).

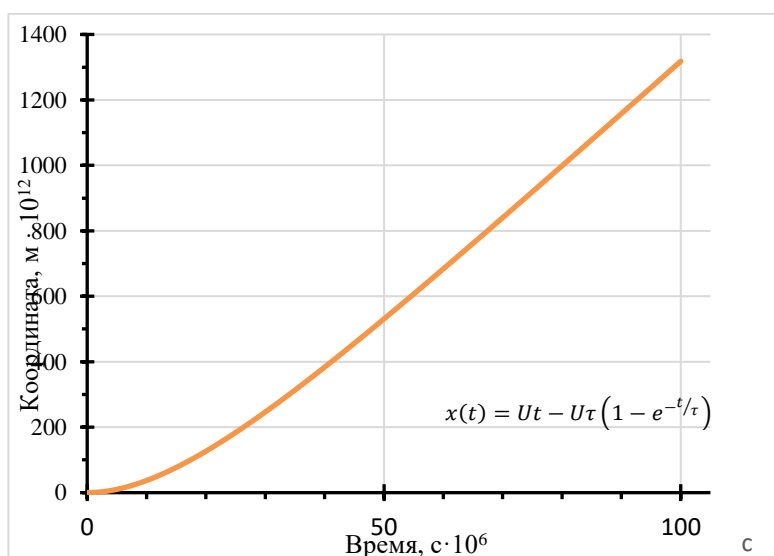


Рис. 4. График зависимости координаты погружения резервуара от времени

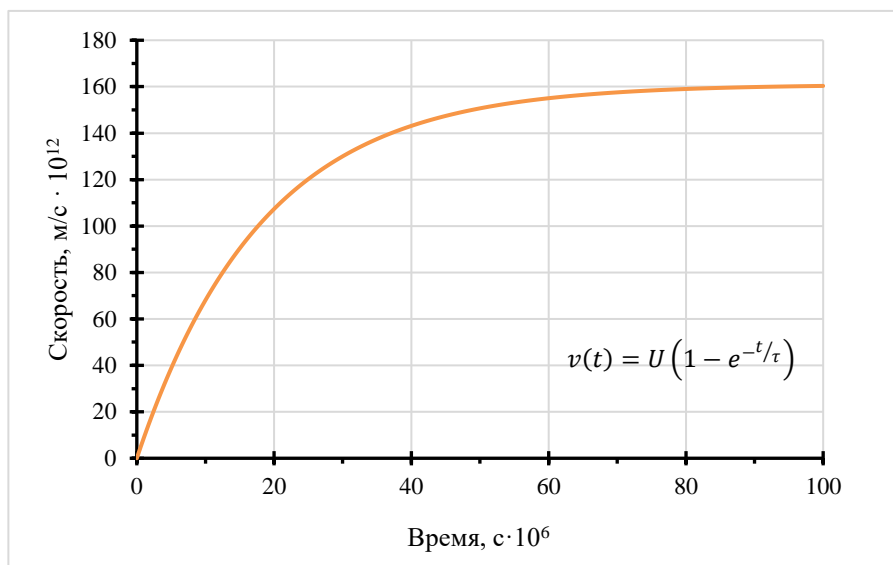


Рис. 5. График зависимости скорости погружения резервуара от времени

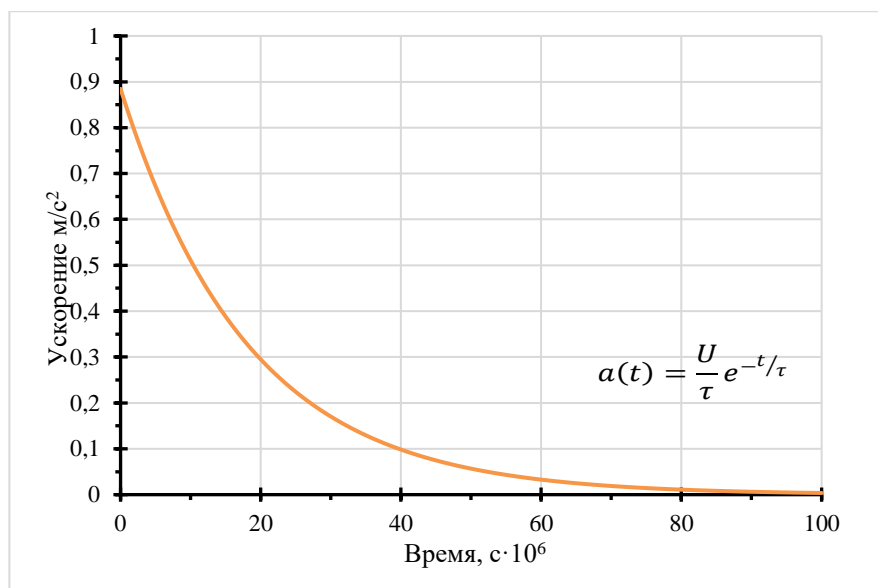


Рис. 6. График зависимости ускорения погружения резервуара от скорости

Вторая методика

Принципиальное отличие второй методики определения закона погружения резервуара заключается в следующем: если погружение резервуара

происходит с большой скоростью, то для такого случая авторы предлагают силу трения принимать пропорциональной квадрату скорости погружения резервуара по следующей формуле:

$$\vec{F}_{\text{тр}} = -c_y \cdot S \cdot \rho_B \cdot \frac{\vec{v}^2}{2},$$

где:

c_y – коэффициент сопротивления при обтекании равномерным установившимся потоком, зависящим от скорости потока, формы обтекаемого тела и состояния его поверхности;

ρ_B – плотность воды, кг/м³.

В проекции на ось ОУ второй закон Ньютона примет вид:

$$m \frac{dv}{dt} = mg - V_T \cdot \rho_B \cdot g - c_y \cdot S \cdot \rho_B \cdot \frac{v^2}{2}.$$

Действуя по алгоритму, описанному для первой методики расчета погружения резервуара, получим:

$$x(t) = Ut - \frac{U\tau}{2} (1 - e^{-2t/\tau});$$

$$v(t) = U (1 - e^{-2t/\tau});$$

$$a(t) = \frac{2 \cdot U}{\tau} e^{-2t/\tau}.$$

Переменные:

$$\tau = \frac{\left[R^2 H + h^2 \left(\frac{3R^2 + h^2}{6h} \right) \right] \cdot 2\rho_T}{c_y \rho_B R^2};$$

$$U = \left(1 - \frac{\rho_B}{\rho_T} \right) \cdot g \cdot \tau.$$

Рассчитаем:

$$\tau = \frac{\left[R^2 H + h^2 \left(\frac{3R^2 + h^2}{6h} \right) \right] \cdot 2\rho_T}{c_y \rho_B R^2} = 80,7 \text{ с};$$

$$U = \left(1 - \frac{\rho_B}{\rho_T} \right) \cdot g \cdot \tau = 71,3 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Аналогично использованию первой методики, на основе полученного закона построим графики зависимости координаты, скорости

и ускорения резервуара от времени, исходя из зависимостей, полученных по второму методу (рис. 7–9).

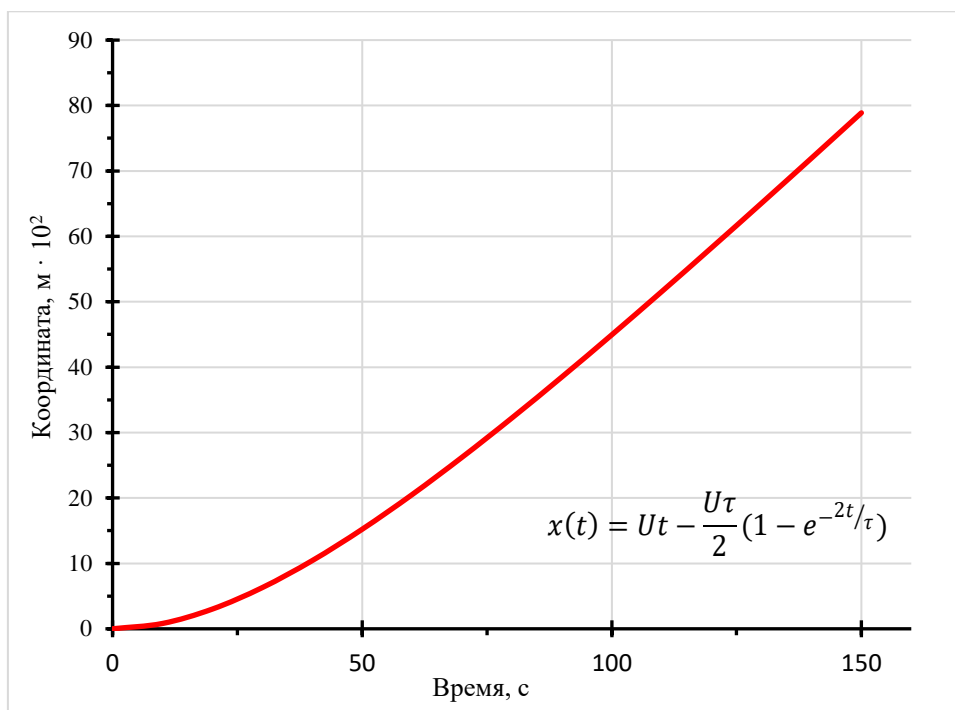


Рис. 7. График зависимости координаты погружения резервуара от времени

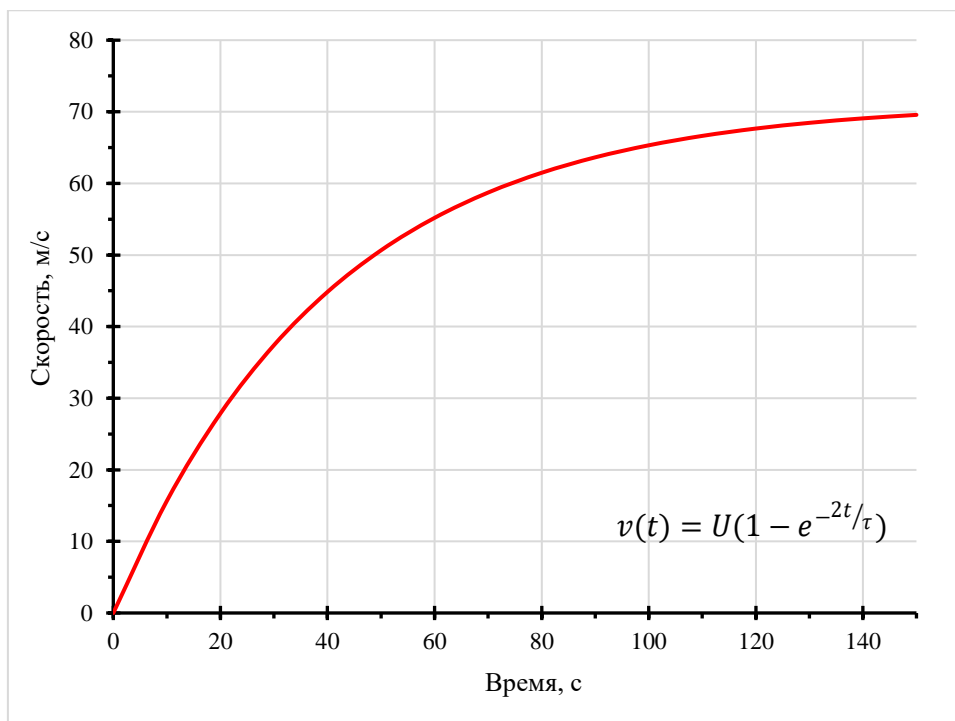


Рис. 8. График зависимости скорости погружения резервуара от времени

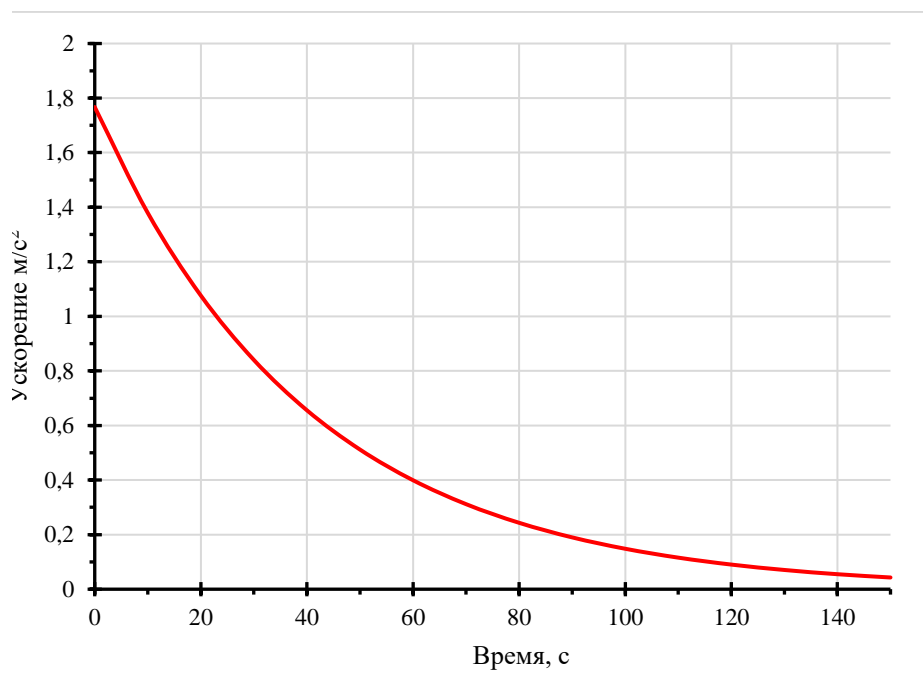


Рис. 9. График зависимости ускорения погружения резервуара от скорости

Из графиков зависимости ускорения от времени (см. рис. 6, 9) видно, что ускорение стремится к нулю. Сила сопротивления постепенно растет и в некоторый момент времени компенсирует силу тяжести, погружение из ускоренного превратится в равномерное.

Анализ графиков на рисунках 4 и 7 показывает, что резервуар, полностью заполненный водой, погрузится на глубину 100 м за 12–15 секунд. Для сравнения, мировой рекорд по погружению в воду на глубину 113 метров (без груза) и всплытие на поверхность А. Молчанов установил за 4 мин. 5 сек [8]. А средняя скорость, с которой резервуар погружается, равна 6–8 м/с; и, если не предпринять никаких действий, резервуар разобьется о дно.

Для торможения резервуара авторами эксперимента предлагается использовать пустые балластные емкости соответствующего объема с последующим

их «отстегиванием» от самого резервуара, или погружение хранилища с помощью мощных лебедок, которые фиксируются на двух расположенных противоположно друг другу баржах большого тоннажа. Стоит отметить, что площадь морского дна под установку резервуара должна быть предварительно выровнена подводными бульдозерами.

Существует еще один вариант управления скоростью спуска. Он заключается в заполнении резервуара оптимальным объемом воды. Объем хранилища остается постоянным, а масса изменяется. Следовательно, сила Архимеда остается неизменной, а сила тяжести в зависимости от количества воды, налитой внутрь резервуара, увеличивается либо уменьшается. Для наглядного представления были построены кривые зависимости времени погружения на глубину 100 м (рис. 10) и средней скорости (рис. 11) от объема закачанной воды в резервуар.

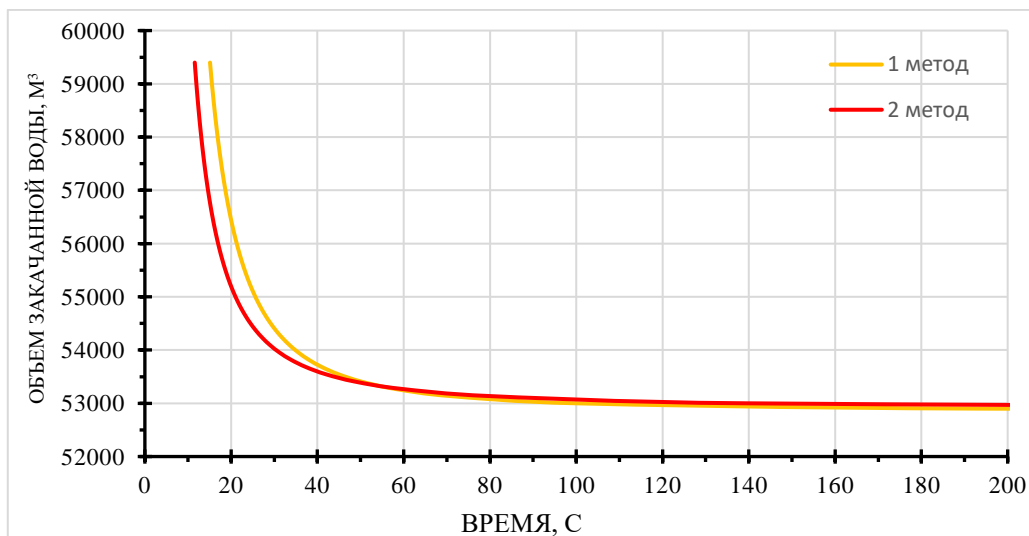


Рис. 10. График зависимости времени погружения резервуара от объема закачанной морской воды

Анализ графиков (см. рис. 10, 11) показал, что для погружения резервуара со средней скоростью менее 1 м/с необходимо закачивать в резервуар перед спуском около 53 000 м³ воды.

График на рис. 10 представляет собой степенную функцию ($y=x^a$, где a — целое, $a < 0$) и показывает, что

с увеличением объема воды внутри резервуара его масса возрастает и, как следствие, сила тяжести становится настолько большой, что силы сопротивления воды и Архимеда не могут компенсировать ее, это приводит к росту ускорения, увеличению скоростей спуска и является нежелательным эффектом.

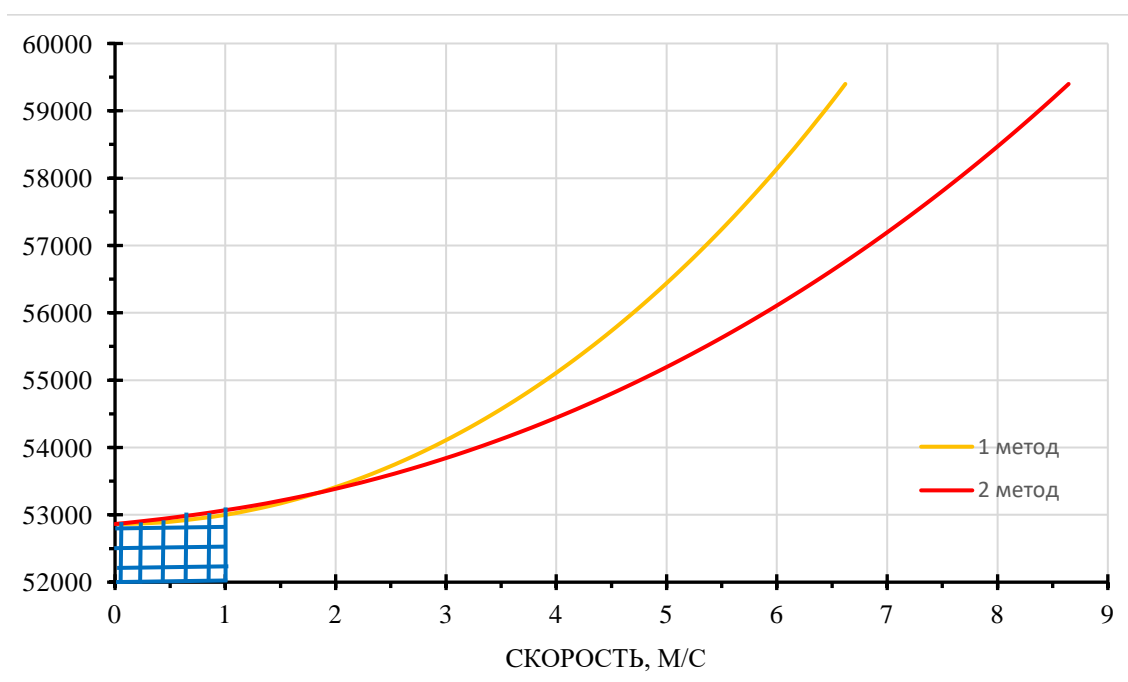


Рис. 11. Выбор оптимального диапазона объема воды для погружения резервуара

Снижение водной массы способствует уменьшению силы тяжести и снижению скорости погружения резервуара. На рис. 11 отмечен оптимальный диапазон объема воды для поддержания средней скорости погружения не выше 1 м/с.

Заключение

В данной работе авторами были предложены две методики определения закона движения резервуара при погружении в воду.

Теперь на этапе проектирования возможно не только установить время погружения резервуара под воду, рассчитать скорости и ускорения в каждый момент времени, но и определить характер погружения резервуара, диапазон объема закачиваемой воды в хранилище для поддержания оптимальной скорости спуска, при которой резервуар с высокой степенью

надежности спустится на дно в невредимом состоянии.

Также были определены два способа погружения резервуара.

Первый вариант: резервуар полностью заполняется водой, и используются балластные емкости или мощные лебедки, установленные на баржах.

Второй вариант: рассчитывается безопасная скорость и время спуска, в соответствии с этим расчетом по графику выбирается объем воды, который нужно закачать в резервуар.

Работа в данном направлении, несомненно, будет иметь продолжение. Планируется проведение эксперимента с использованием метода конечных элементов в программных комплексах ANSYS, ABAQUS. В настоящее время ведутся работы по патентованию подводного резервуара СПГ, предложенного авторами.

Статья написана в рамках выполнения государственного задания (тема «Исследование термодинамических свойств углеводородных смесей, моделирование гидротермодинамических, физико-химических и геомеханических процессов в геосредах с целью повышения эффективности разработки трудноизвлекаемых запасов нефти и газа», № АААА-А19-119030690057-5).

Литература:

1. Гусейнов Ч.С. Освоение углеводородных ресурсов Северного Ледовитого океана – ближайшая и неотложная перспектива // Бурение и нефть. 2012. № 1. С. 20–23.
2. Гусейнов Ч.С., Надеин В.А. Зонирование длительно замерзающих арктических акваторий по глубинам с целью освоения открываемых нефтегазовых месторождений существующими и новыми предлагаемым техническими средствами и технологиями // Бурение и нефть. 2017. № 4. С. 10–17.
3. Хазеев В.Б., Гусейнов Ч.С. Оценка внешних воздействий на погружные и подводные морские нефтегазовые сооружения в условиях Арктического шельфа // Бурение и нефть. 2018. № 3. С. 24-27.
4. Ревинская О.Г., Кравченко Н.С. Движение тела в вязкой среде. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. 22 с.
5. Яблонский А.А. Курс теоретической механики. Часть II. Динамика. М.: Высшая школа, 1971. 488 с.

6. *Савосин Д.* Для Арктик СПГ-2. ССК Звезда начал строительство 2-го танкера-газовоза СПГ класса Arc 7 // Neftegaz.Ru. 2021. 19 января. <https://neftgaz.ru/news/Suda-i-sudostroenie/659890-dlya-arktiki-spg-2-ssk-zvezda-nachal-stroitelstvo-2-go-tankera-gazovoza-spg-klassa-arc-7/> (Дата обращения 16.04.2021).

7. *Гусейнов Ч.С., Земляновский В.А.* Расчет прочности и теплоизоляции подводного резервуара СПГ // Бурение и нефть. 2021. № 6. С. 42–46.

8. Freediving – constant weight with bi-fins (male). <https://www.guinnessworldrecords.com/world-records/609151-freediving---constant-weight-with-bi-fins-male> (Дата обращения 06.06.2021).

A technology for seabed installation of an underwater massive tank

Ch.S. Guseynov^{1,2*}, V.A. Zemlyanovskiy^{1**}

1 – Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Moscow

2 – Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow

E-mail: *guseynov2@yandex.ru, **vadim200007@mail.ru

Abstract. This paper attempts to determine the law of motion of a tank as a large volumetric massive structure when immersed in a resisting liquid medium. The authors propose two methods for its determination. Dependence graphs of coordinates, speed, acceleration of the tank versus time are plotted. The dependence of time and speed of lowering of a massive storage structure on the volume of pumped water is determined. In addition, the range of the optimal volume of water pumped inside the tank for the purpose of its soft landing is determined.

Keywords: tank immersion, law of motion, underwater tank, resisting liquid medium.

Citation: Guseynov Ch.S., Zemlyanovskiy V.A. A technology for seabed installation of an underwater massive tank // Actual Problems of Oil and Gas. 2021. Iss. 2(33). P. 38–51. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2021-33.art4> (In Russ.).

References

1. Guseynov Ch. Assimilation of Arctic hydrocarbon resources – very near, but urgent perspective // Drilling and Oil. 2012. No. 1. P. 20–23. (In Russ.).
2. Guseynov Ch.S., Nadein V.A. Zoning long-freezing arctic waters to the depths with the goal of development of open oil and gas fields existing and the proposed new technical means and technologies // Drilling and Oil. 2017. No. 4. P. 10–17. (In Russ.).
3. Hazejev V.B., Guseynov Ch.S. Estimation of environmental loads on underwater and floating platforms in Arctic shelf conditions // Drilling and Oil. 2018. No. 3. P. 24–27. (In Russ.).
4. Revinskaya O.G., Kravchenko N.S. The motion of a body in a viscous medium. Tomsk: Tomsk Polytechnic University Press, 2011. 22 p. (In Russ.).
5. Yablonsky A.A. Course of theoretical mechanics. Part II. Dynamics. Moscow: Vysshaya Shkola, 1971. 488 p. (In Russ.).
6. Savosin D. For Arctic LNG-2. SSC Zvezda started construction of the 2nd LNG tanker of the Arc 7 class // Neftegaz.Ru. 2021. 19 January. <https://neftegaz.ru/news/Suda-i-sudostroenie/659890-dlya-arktisk-spg-2-ssk-zvezda-nachal-stroitelstvo-2-go-tankera-gazovoza-spg-klassa-arc-7/> (Accessed on 16.04.2021). (In Russ.).
7. Guseynov Ch.S., Zemlyanovskiy V.A. Calculation of strength and thermal insulation of an underwater LNG tank // Drilling and Oil. No. 6. P. 42–46. (In Russ.).
8. Freediving – constant weight with bi-fins (male) // Guinness World Records. <https://www.guinnessworldrecords.com/world-records/609151-freediving---constant-weight-with-bi-fins-male> (Accessed on 06.06.2021).