

МЕХАНИКА

УДК 539.422.3

DOI: 10.31429/vestnik-18-3-35-39

К ИССЛЕДОВАНИЮ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА НЕФТЕДОБЫВАЮЩЕЙ МОРСКОЙ ПЛАТФОРМЕ

Рубцов С. Е., Павлова А. В., Зарецкая М. В., Лозовой В. В.

ON THE STUDY OF THE GEOECOLOGICAL CONSEQUENCES OF PRODUCTION
ACTIVITIES ON AN OIL-PRODUCING OFFSHORE PLATFORM

S. E. Rubtsov¹, A. V. Pavlova¹, M. V. Zaretskaya¹, V. V. Lozovoy²

¹ Kuban State University, Krasnodar, Russia

² Southern Scientific Centre of Russian Academy of Science, Rostov-on-Don, Russia
e-mail: pavlova@math.kubsu.ru

Abstract. At the present stage, in connection with a decrease in the level of hydrocarbon production on continental fields, offshore fields on the shelf should become the main source. Offshore platforms located in the open sea are exposed to various environmental factors, in turn, affect the geoeological medium of the continental shelf. The processes of development of hydrocarbon deposits are accompanied, as a rule, by an increase in the level of seismicity and, in particular, by the occurrence of man-made earthquakes.

To study the dynamics of tension, the problem of vibration of a block hydroelastic system consisting of an ideal fluid layer on a deformable half-space is considered, which simulates the production process on an offshore oil platform. Vibration is caused by the action of a concentrated harmonic source located in a layer of ideal fluid. The problem of determining the contact stresses arising in the system between the liquid layer and the elastic foundation is solved. The nature of the distribution of contact stresses is determined by a set of system parameters: the intensity and frequency of vibrations, mechanical characteristics and density of the elastic medium and liquid, and the thickness of the liquid layer.

The results obtained in this work can be useful to organizations monitoring deformation, geodynamic processes and seismicity of the territory to assess the possible increase in seismic intensity.

Keywords: oil production platform, technogenic seismicity, hydroelastic system, wave fields, contact stresses.

Введение

На современном этапе, в связи с выходом добычи нефти на континентальных месторождениях на стационарный режим и с учетом ожидаемого дальнейшего снижения уровня, становится очевидным, что основным источником углеводородов, способным удовлетворить спрос на ближайшие десятилетия, должны стать морские месторождения. Поэтому в мире активно разрабатываются шельфовые месторождения углеводородного сырья и дру-

гих минеральных ресурсов. Производственный процесс извлечения углеводородов осуществляется морскими нефтегазовыми платформами, которые в настоящее время поставляют до 35 % объемов добычи нефти и 27 % добычи газа.

В Энергетической стратегии России на период до 2035 г. освоение нефтегазовых запасов континентального шельфа рассматривается как одно из Стратегией развития морской деятельности Российской Федерации до 2030 г. одной из главных задач провозглаша-

Рубцов Сергей Евгеньевич, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры математического моделирования Кубанского государственного университета; e-mail: rub_serg@mail.ru.

Павлова Алла Владимировна, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры математического моделирования Кубанского государственного университета; e-mail: pavlova@math.kubsu.ru.

Зарецкая Марина Валерьевна, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры математического моделирования Кубанского государственного университета; e-mail: zarmv@mail.ru.

Лозовой Виктор Викторович, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Южного научного центра РАН; e-mail: niva_kgu@mail.ru.

Отдельные результаты работы получены при поддержке РФФИ (проект 19-08-00145), РФФИ и Администрации Краснодарского края (проект 19-41-230002).

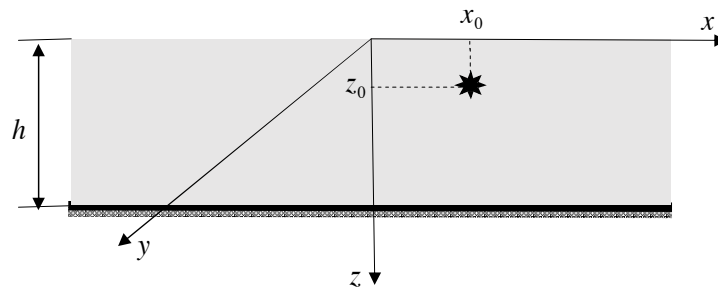


Рис. 1. Гидроупругая система, моделирующая производственный процесс на добывающей платформе

ется увеличение числа технических средств и оборудования для разработки морских нефтегазовых и минеральных месторождений, включая морские платформы и подводно-надводные комплексы [1].

Для разработки морских месторождений используются различные гидротехнические сооружения, среди которых отдельно следует выделить стационарные морские платформы. Эти платформы расположены в открытом море и, подвергаясь воздействию различных факторов внешней среды, в свою очередь оказывают воздействие на геоэкологическую среду континентального шельфа [2–4].

Процессы разработки месторождений углеводородов сопровождаются, как правило, повышением уровня сейсмичности, в частности, возникновением техногенных землетрясений и других деформационных явлений, связанных с изменением геодинамического режима. Для мониторинга деформационных и геодинамических процессов должна быть организована служба сейсмического мониторинга. Аналогичная система мониторинга также необходима для анализа афтершоков и вулканической активности. Технология мониторинга должна основываться на использовании надежных и быстрых методов автоматического обнаружения и локализации сейсмических событий различного масштаба. Традиционные подходы к обнаружению и локализации эпицентров и гипоцентров землетрясений основаны на анализе данных, зарегистрированных одной или несколькими одиночными сейсмическими станциями. В этом случае координаты сейсмического события оцениваются посредством выделения сигнала из шума и точного измерения времени прихода ряда конкретных фаз сейсмического сигнала в каждую точку регистрации. Существующие вычислительные методы унаследовали этот традиционный подход. Однако автоматические

процедуры, основанные на идеологии ручной обработки, оказываются крайне трудоемкими и малоэффективными из-за сложности алгоритмов, адекватных действиям опытного геофизика-интерпретатора [2].

В работе описывается один из подходов, состоящий в анализе волновых полей, возникающих при осуществлении производственного процесса на морской платформе. Предложенные модели также могут применяться для исследования колебаний плавающей ветряной турбины (как многотельной системы), причалов плавучих платформ, виброгасителей и других технических объектов.

1. Постановка задачи

Рассматривается задача о вибрации гидроупругой системы, состоящей из слоя идеальной жидкости на деформируемом полупространстве, вызванной воздействием сосредоточенного гармонического источника, расположенного в слое идеальной жидкости (рис. 1) в точке с координатами (x_0, y_0, z_0) . Гидроупругая система моделирует производственный процесс на морской нефтедобывающей платформе.

Движение точек в слое идеальной жидкости, удовлетворяет волновому уравнению для потенциала скоростей

$$S(x, y, z, t) = \varphi(x, y, z) \exp(-i\omega t),$$

$$\begin{aligned} \Delta S(x, y, z, t) &= \\ &= \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 S(x, y, z, t)}{\partial t^2} + f(x, y, z, t), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f(x, y, z, t) &= \\ &= A\delta(x - x_0, y - y_0, z - z_0) \exp(-i\omega t), \end{aligned} \quad (1.1)$$

где ω — частота колебаний; c — скорость звука в идеальной жидкости; функция

$f(x, y, z, t)$ моделирует точечный источник колебаний с заданной амплитудой A .

Движение точек упругого полупространства описывается вектором перемещений $\mathbf{u}(x, y, z, t) = \{u, v, w\}$, удовлетворяющим уравнению Ляме

$$(\lambda + \mu) \operatorname{grad}(\operatorname{div} \mathbf{u}) + \mu \Delta \mathbf{u} - \rho_1 \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = 0, \quad (1.2)$$

λ, μ, ρ_1 — упругие характеристики и плотность материала полупространства.

Верхняя граница жидкости считается свободной от воздействия

$$\rho_0 \left. \frac{\partial S}{\partial t} \right|_{z=0} = 0. \quad (1.3)$$

На нижней границе жидкость подвергается воздействию со стороны упругого полупространства

$$\rho_0 \left. \frac{\partial S}{\partial t} \right|_{z=h} = -q(x, y) \exp(-i\omega t), \quad (1.4)$$

где $q(x, y)$ — неизвестное давление на границе раздела сред, а ρ_0 — плотность идеальной жидкости.

Тензор напряжений упругой среды удовлетворяет следующим условиям на нижней границе

$$\begin{aligned} \tau_{zy}|_{z=h} &= 0, \\ \tau_{xz}|_{z=h} &= 0, \\ \sigma_z|_{z=h} &= q(x, y) \exp(-i\omega t), \end{aligned} \quad (1.5)$$

где τ_{zy}, τ_{xz} — касательные напряжения, σ_z — нормальное напряжение:

$$\begin{aligned} \tau_{xz} &= \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right), \\ \tau_{yz} &= \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right), \\ \sigma_z &= \lambda \operatorname{div} \mathbf{u} + 2\mu \frac{\partial w}{\partial y}. \end{aligned} \quad (1.6)$$

Для упругого полупространства при

$$\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \rightarrow \infty, \quad \mathbf{u} \rightarrow 0$$

и выполняется условие излучения типа Зоммерфельда [5].

Условия сопряжения в области контакта жидкости и упругой среды записывается в виде равенства вертикальных компонент скоростей

$$\left(\frac{\partial w}{\partial t} - \frac{\partial s}{\partial z} \right) \Big|_{z=h} = 0. \quad (1.7)$$

Задача решается в плоской постановке.

2. Решение поставленных граничных задач о колебаниях гидроупругой системы

Решение поставленных граничных задач в гидроупругой системе простейшего вида получаем для жидкого слоя и упругой среды, применяя метод интегральных преобразований.

Получим решение задачи для слоя жидкости.

Краевая задача (1.1), (1.3), (1.4) для жидкости в плоской постановке при условии установившегося режима колебаний принимает вид

$$\Delta \varphi(x, z) = -\frac{\omega^2}{c^2} \varphi(x, z) + f(x, z), \quad (2.1)$$

$$\begin{cases} \varphi(x, z)|_{z=0} = 0, \\ \varphi(x, z)|_{z=h} = \frac{-iq(x)}{\omega \rho_0}. \end{cases}$$

Как это было проделано в [6], применив к системе (2.1) интегральное преобразование Фурье [7], после ряда преобразований получим интегральную характеристику потенциала скоростей, зависящую от неизвестной функции $Q(\alpha)$

$$\Phi(\alpha, z) = \begin{cases} 0, & z < z_0, \\ \frac{A \exp(i\alpha x_0) \operatorname{sh}(zk) (\exp(z_0 k) - 1)}{k} - \frac{iQ(\alpha) \operatorname{sh}(zk)}{\omega \rho_0 \operatorname{sh}(hk)}, & z > z_0. \end{cases}$$

где $Q(\alpha)$ — трансформанта Фурье по переменной x неизвестной функции контактного давления q (1.4); $k = \pm \sqrt{\alpha^2 - \frac{\omega^2}{c^2}}$.

Аналогично получим решение задачи для упругого полупространства.

Краевая задача (1.2), (1.5), (1.6) для упругого полупространства в плоской постановке при условии установившегося режима колебаний имеет вид

$$\begin{cases} (\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \mu \Delta u + \rho \omega^2 u = 0, \\ (\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \mu \Delta w + \rho \omega^2 w = 0; \end{cases}$$

$$\begin{aligned} \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \Big|_{z=h} &= 0; \\ \left(\lambda \frac{\partial u}{\partial x} + (\lambda + 2\mu) \frac{\partial w}{\partial z} \right) \Big|_{z=h} &= q(x); \\ u|_{\sqrt{x^2+z^2} \rightarrow \infty} &\rightarrow 0; \quad w|_{\sqrt{x^2+z^2} \rightarrow \infty} \rightarrow 0. \end{aligned}$$

Фурье-образы компонент вектора амплитуд смещений с учетом условия излучения типа Зоммерфельда принимают вид

$$\begin{aligned} U(\alpha, z) &= \frac{-iQ(\alpha)\alpha}{4\mu\Delta(\alpha)} [2\beta_3\beta_1 \exp(\beta_1(z-h)) - \\ &\quad - (2\alpha^2 - \kappa_1^2) \exp(\beta_3(z-h))]; \\ W(\alpha, z) &= \frac{Q(\alpha)\beta_3}{4\mu\Delta(\alpha)} [2\alpha^2 \exp(\beta_1(z-h)) - \\ &\quad - (2\alpha^2 - \kappa_1^2) \exp(\beta_3(z-h))], \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} \Delta(\alpha) &= \beta_3\beta_1\alpha^2 - (\alpha^2 - \kappa_1^2/2)^2, \\ \kappa_1^2 &= \frac{\rho\omega^2}{\mu}, \quad \kappa_2^2 = \frac{\rho\omega^2}{(\lambda + 2\mu)}, \\ \eta_1 &= \alpha^2 - \kappa_1^2, \quad \eta_2 = \alpha^2 - \kappa_2^2, \\ \beta_1 &= \sqrt{\eta_1}, \quad \beta_2 = -\sqrt{\eta_1}, \\ \beta_3 &= \sqrt{\eta_2}, \quad \beta_4 = -\sqrt{\eta_2}. \end{aligned}$$

Для определения неизвестной функции $Q(\alpha)$ воспользуемся условием на границе контакта сред (1.7). Получим

$$Q(\alpha) = \frac{-4i\mu\omega\rho_0 A \exp(i\alpha x_0) \Phi^*(\alpha)}{\Psi^*(\alpha)} \quad (2.2)$$

где

$$\begin{aligned} \Phi^*(\alpha) &= \operatorname{ch}(hk) \operatorname{sh}(hk) (\exp(z_0 k) - 1) \Delta(\alpha), \\ \Psi^*(\alpha) &= \omega^2 \rho_0 \beta_3 \kappa_1^2 \operatorname{sh}(hk) + k \operatorname{ch}(hk) 4\mu\Delta(\alpha). \end{aligned}$$

Аналитическое выражение для $q(x)$ получаем, применив к (2.2) обратное преобразование Фурье [7]

$$q(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} Q(\alpha) \exp(-i\alpha x) d\alpha,$$

будем иметь

$$\begin{aligned} q(x) &= \frac{2A\mu\omega\rho_0}{i\pi} \times \\ &\times \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\exp(i\alpha(x_0 - x)) \Phi^*(\alpha)}{\Psi^*(\alpha)} d\alpha. \quad (2.3) \end{aligned}$$

Для вычисления интеграла (2.3) замкнем контур интегрирования в верхнюю полуплоскость для $x < x_0$, а для $x > x_0$ — в нижнюю полуплоскость, и применим теорему Коши о вычетах [8]. Чтобы применить теорему Коши о вычетах необходимо найти особые точки подынтегральной функции (2.3). Таковыми являются: две точки ветвления и конечное число симметричных полюсов $\alpha = \pm\alpha_j^*$. Для случая однократных полюсов

$$\begin{aligned} q(x) &= i \sum_{j=1}^N \operatorname{res}_{\pm\alpha_j^*} (Q(\alpha) \exp(-i\alpha x)) - \\ &\quad - \sum_{k=1}^2 \int_{\Gamma_k^\pm} Q(\alpha) \exp(-i\alpha x) d\alpha, \end{aligned}$$

где $\pm\alpha_j^*$ — полюса функции $Q(\alpha)$, Γ_k^\pm — берега разрезов точек ветвления.

Для простых полюсов при условии четности функций функции Φ^* , Ψ^*

$$\begin{aligned} q(x) &= \pm \sum_{j=1}^N \frac{\Phi^*(\alpha_j^*) \exp(\mp i\alpha_j^*(x - x_0))}{\frac{d}{d\alpha} \Psi^*(\alpha_j^*)} - \\ &\quad - \int_{\Gamma_1^\pm} Q(\alpha) \exp(-i\alpha x) d\alpha - \\ &\quad - \int_{\Gamma_2^\pm} Q(\alpha) \exp(-i\alpha x) d\alpha. \quad (2.4) \end{aligned}$$

При $x < x_0$ в выражении (2.4) берется верхний знак, а при $x > x_0$ — нижний.

Полученные результаты могут быть полезны природоохранным организациям при мониторинге деформационных, геодинамических процессов и сейсмичности территории, для оценки возможного роста сейсмической напряженности при осуществлении производственной деятельности нефтедобывающих компаний.

Литература

1. Об Энергетической стратегии РФ на период до 2035 г. Распоряжение Правительства РФ от 9 июня 2020 г. № 1523-р.
2. Shubik B.M. New approaches to the synthesis of automatic seismic monitoring systems // *Geology and Mineral Resources of Siberia*. 2020. Vol. 2020. № 4. P. 73–81.
3. Slatnick S.C., Fenz D.M., Sheppard R.E., Turner J.W. Seismic challenges and structural solutions on the Berkut platform // *Society of Petroleum Engineers - SPE Arctic and Extreme Environments Conference and Exhibition, AEE 2013*. 2013. Vol. 2. P. 1725–1755.
4. Capuano P., Basco A., Ruocco A.D., Esposito S., Fusco G., Garcia-Aristizabal A., Mercogliano P., Salzano E., Solaro G., Teofilo G.G., Scandone P., Gasparini P. The ARGO Project: Assessing NA-TECH risks on offshore oil platforms // *Energy Procedia*. 2017. Vol. 125. P. 145–152.
5. Бабешко В.А., Глушков Е.В., Зинченко Ж.Ф. Динамика неоднородных линейно-упругих сред. М.: Наука, 1989. 344 с.
6. Нижник М.П., Павлова А.В., Рубцов С.Е. К решению одной задачи для упругого полупространства с жидким включением // *Экологический вестник черноморского экономического сотрудничества*. 2006. № 2. С. 40–43.
7. Снеддон И. Преобразования Фурье. М.: Изд-во иностр. лит., 1955. 668 с.
8. Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. Методы теории функций комплексного переменного. М.: Наука, 1987. 688 с.

References

1. On the Energy Strategy of the Russian Federation for the period up to 2035. Order of the Government of the Russian Federation dated June 9, 2020. No. 1523-p. (In Russian)
2. Shubik, B.M. New approaches to the synthesis of automatic seismic monitoring systems. *Geology and Mineral Resources of Siberia*, 2020, vol. 2020, no. 4, pp. 73–81.
3. Slatnick, S.C., Fenz, D.M., Sheppard, R.E., Turner, J.W. Seismic challenges and structural solutions on the Berkut platform. *Society of Petroleum Engineers - SPE Arctic and Extreme Environments Conference and Exhibition, AEE 2013*, 2013, vol. 2, pp. 1725–1755.
4. Capuano, P., Basco, A., Ruocco, A.D., Esposito, S., Fusco, G., Garcia-Aristizabal, A., Mercogliano, P., Salzano, E., Solaro, G., Teofilo, G.G., Scandone, P., Gasparini, P. The ARGO Project: Assessing NA-TECH risks on offshore oil platforms. *Energy Procedia*, 2017, vol. 125, pp.145–152.
5. Babeshko, V.A., Glushkov, E.V., Zinchenko, Zh.F. *Dynamics of inhomogeneous linear elastic media*. Nauka, Moscow, 1989. (In Russian)
6. Nizhnik M.P., Pavlova A.V., Rubtsov S.E. To the solution of one problem for elastic half-space with a liquid inclusion. *Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*, 2006, no. 2, pp. 40–43. (In Russian)
7. Sneddon, I. *Fourier Transforms*. Publishing house of foreign. lit., Moscow, 1955. (In Russian)
8. Lavrent'ev, M.A., Shabat, B.V. *Methods of the theory of functions of a complex variable*. Moscow, Nauka, 1987. (In Russian)