



DOI 10.22363/2312-8143-2022-23-1-65-74  
УДК 626.01

Научная статья / Research article

## Экспериментальные исследования влияния волнения на подводный трубопровод

К.П. Мордвинцев , Е.М. Корнеева  

Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация  
 korneeve.e.m@yandex.ru

### История статьи

Поступила в редакцию: 10 января 2022 г.  
Доработана: 21 марта 2022 г.  
Принята к публикации: 28 марта 2022 г.

### Ключевые слова:

морской подводный трубопровод,  
устойчивость трубопровода,  
экспериментальные исследования

**Аннотация.** Представлены результаты экспериментальных исследований по воздействию волновой нагрузки на заглубленный трубопровод. В настоящее время происходит активное освоение больших месторождений, расположенных на шельфе и северных реках (таких как Обская губа, Енисей), откуда должна производиться доставка к местам потребления. Наиболее удобным видом транспортировки жидких веществ является трубопровод. Чаще всего его трасса пересекает водные территории, размеры которых могут достигать пяти километров и более. Подобные габариты допускают возникновение волновой нагрузки, действующей на трубопровод. Вопрос его устойчивости особенно актуален для проектировщиков, чтобы избежать возникновения аварийных ситуаций в ходе эксплуатации. На сегодняшний день нормативная документация не рассматривает этот вопрос. Учитывается только сила Архимеда без волнового воздействия. Причины и процесс перемещения трубы в грунте вверх с большим трудом поддаются теоретическому анализу, поэтому в основном изучаются эмпирическими методами. В данной работе экспериментальным путем устанавливается зависимость между волновой нагрузкой и выталкивающей силой. Проводится серия экспериментов с меняющимися параметрами волны и заглубления трубопровода. Материалы исследования будут полезны проектировщикам подводных морских трубопроводов.

### Для цитирования

Мордвинцев К.П., Корнеева Е.М. Экспериментальные исследования влияния волнения на подводный трубопровод // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2022. Т. 23. № 1. С. 65–74.  
<http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-1-65-74>



## Experimental studies of the impact of waves' loading on the underwater pipeline

Konstantine P. Mordvintsev , Ekaterina M. Korneeva ✉

*Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russian Federation*

✉ korneeva.e.m@yandex.ru

### Article history

Received: January 10, 2022

Revised: March 21, 2022

Accepted: March 28, 2022

### Keywords:

submarine pipeline, pipeline stability, experimental studies

**Abstract.** This work is devoted to the results of experimental studies on the impact of wave loading on a buried pipeline. Currently, there is an active development of large deposits located on the shelf and the northern rivers (Ob Bay, Yenisei), from where delivery to the places of consumption should be made. The most convenient type of transportation is the pipeline. Its route often crosses water areas, the size of which can reach five kilometres or more. Such dimensions allow the occurrence of a wave load acting on the pipeline. The issue of pipeline stability is especially relevant for designers in order to avoid accidents during operation. Nowadays, the regulatory documentation does not address this issue. Only the force of Archimedes is considered, without taking into account the wave action. The causes and process of moving the pipe up in the ground are difficult to theoretically analyze, therefore, it is mainly studied by empirical methods. In this work, the dependence between the wave load and the buoyancy force is established experimentally. The series of experiments was conducted with changing wave parameters and pipeline depth. This article will be useful for submarine pipeline designers.

### For citation

Mordvintsev KP, Korneeva EM. Experimental studies of the impact of waves' loading on the underwater pipeline. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2022;23(1):65–74. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-1-65-74>

### Введение

В настоящее время наиболее распространенным способом транспортировки добываемых полезных ископаемых, таких как нефть и газ, является трубопровод. При прокладке любого трубопровода необходимо решение достаточно большого количества технических задач. Учитывая географическую специфику расположения месторождений в России, при прокладке трубопроводов необходимо преодолевать большое количество водных преград и прокладывать их по дну морей. В этом случае важным является вопрос обеспечения устойчивости трубопровода от всплытия при его эксплуатации.

Для решения данной проблемы активно используется метод балластировки трубопровода, однако опыт эксплуатации показал, что в условиях прокладки трубопровода по морскому дну (морские трубопроводы), этого может быть недостаточно.

Многочисленные эксперименты, проводившиеся как в России, так и за рубежом<sup>1</sup> [1–5], показали, что на устойчивость трубопровода, по-

груженного в грунт на морском дне, оказывает влияние большое количество внешних сил.

Исследование влияния волны цунами на устойчивость трубопровода [3], установило, что существует зависимость гидродинамической силы в подводных трубопроводах от высоты волны и глубины.

Изучение влияния сейсмической нагрузки на трубопровод показало, что ее воздействие приводит к разжижению грунта [6]. Причиной этого являлось избыточное поровое давление, возникающее во время вибрации. Грунт вокруг трубопровода постепенно растекается, что вызывает изменение веса перекрывающего грунта, в результате чего нарушается равновесие трубопровода и труба всплывает.

Помимо этого, изучалось влияние волновой нагрузки [7]. Было измерено изменение порового давления около трубы во время волнового воздействия, которое носит колебательный характер. Исследования показали, что чем больше время действия и амплитуда гидродинамической вертикальной силы, тем короче время всплытия трубопровода.

Экспериментальным путем [8] определено, что под воздействием волновой нагрузки меняет-

<sup>1</sup> СП 107-34-96. Балластировка, обеспечение устойчивости положения газопроводов на проектных отметках / РАО «ГАЗПРОМ». М., 1996. 47 с.

ся структура грунта у оснований морских гидротехнических сооружений. Данная нагрузка увеличивает пористость грунтов, что может влиять на обеспечение устойчивости гидротехнических сооружений.

На сегодняшний день нормативная документация по расчету устойчивости морских трубопроводов<sup>2</sup> учитывает только силу Архимеда, не принимая во внимание волновое воздействие. Причины и процесс перемещения трубы в грунте вверх трудно поддаются теоретическому анализу, поэтому в основном изучаются эмпирическими методами.

Во многих исследованиях утверждается, что в случае расположения трубопровода в условиях мелкой воды волнение влияет на его устойчивость как за счет взвешивающего волнового воздействия, так и за счет разжижения грунтов.

В данной работе приводятся результаты лабораторного исследования влияния волнения на устойчивость трубопроводов.

### Основные теоретические положения

На рис. 1 изображен поперечный разрез заглубленного трубопровода.

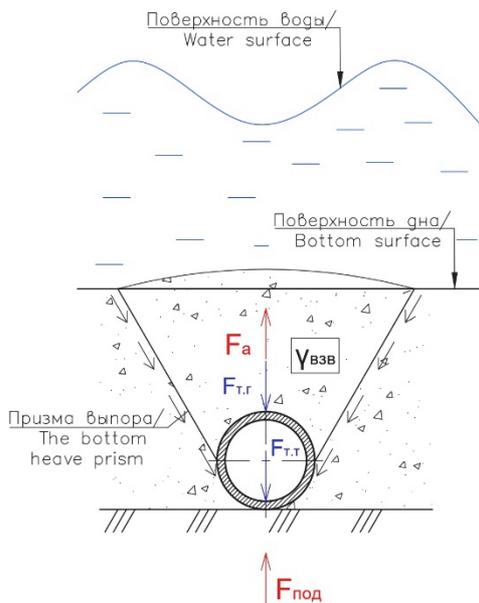


Рис. 1. Схема приложения нагрузок  
Figure 1. Load application diagram

Предположим, что на трубопровод действуют две нагрузки: сила тяжести  $F_T$  и поднимающая сила  $F_{\Pi}$ . В значение нагрузки  $F_T$  входят сила тяжести грунта призмы выпора  $F_{T,г}$  и собственный вес трубопровода  $F_{T,т}$ . В значение нагрузки  $F_{\Pi}$  входят сила Архимеда  $F_a$  и подъемная сила  $F_{\text{под}}$ , природу которой мы попытаемся установить. Таким образом, можно составить следующие выражения:

$$F_T = F_{T,г} + F_{T,т};$$

$$F_{\Pi} = F_a + F_{\text{под}}.$$

Рассмотрим участок трубопровода длиной 1 м. Значение величины  $F_{T,г}$  определяется по формуле  $F_{T,г} = mg + \frac{\pi d^2}{4} \rho$ , где  $m$  – масса погонного метра трубы,  $g$  – ускорение свободного падения,  $d$  – диаметр трубопровода,  $\rho$  – плотность заполнителя. Масса внутреннего заполнителя несоизмеримо мала в сравнении с массой трубопровода, поэтому на данной стадии мы ее опускаем.

Предполагается, что грунт находится в разжиженном состоянии [9].

Причиной разжижения могут быть сейсмические воздействия [10] и интенсивно повторяющееся гидродинамическое воздействие на грунт [11–13].

Значение величины  $F_{T,т}$  определяется по формуле  $F_{T,т} = S \rho_{р,гр}$ , где  $S$  – площадь призмы выпора,  $\rho_{р,гр}$  – плотность разжиженного грунта, вычисляемая по формуле  $\rho_{р,гр} = \frac{\rho_{ск,гр} \cdot \rho_{в} \cdot (1 + \omega)}{\rho_{ск,гр} \cdot \omega + 1}$ , где  $\rho_{ск,гр}$  – плотность скелета грунта,  $\rho_{в}$  – плотность воды,  $\omega$  – природная влажность грунта.

Значение величины силы Архимеда определяется следующим образом [14]:

$$F_a = \rho_{в} g W,$$

где  $\rho_{в}$  – плотность воды;  $W$  – объем трубопровода, вычисляемый по формуле

$$W = \frac{\pi d^2}{4} l = \frac{\pi d^2}{4}.$$

Требуется добиться соблюдения условия  $F_{T,г} = F_a$ , при котором тело не тонет, а находится во взвешенном состоянии.

Если под воздействием волновой нагрузки трубопровод начинает терять устойчивость, можно

<sup>2</sup> СП 33.13330.2012. Расчет на прочность стальных трубопроводов. М., 2013. П. 9.

заключить, что величина  $F_{\text{под}}$  отлична от нуля. Тогда можно составить следующее выражение:

$$F_{\text{под}} \geq F_T - F_a.$$

Подставим вышеупомянутые выражения:

$$F_{\text{под}} \geq mg + S \left( \frac{\rho_{\text{ск.гр}} \cdot \rho_{\text{в}} \cdot (1 + \omega)}{\rho_{\text{ск.гр}} \cdot \omega + 1} \right) - \rho_{\text{в}} g \left( \frac{\pi d^2}{4} \right).$$

Таким образом, получим минимальное значение подъемной силы.

Представим выражение подъемной силы в виде параметрической функции  $F_{\text{под}} = f(h, \lambda, d, t)$ , где  $h$  – высота волны,  $\lambda$  – длина волны,  $D$  – глубина воды,  $t$  – глубина погружения трубы в грунт. Предполагается, что в данной ситуации оказывают влияние вязкость жидкости и коэффициент сопротивления грунта. Но на данной стадии проведения экспериментов эти показатели опускаются.

Чтобы упростить зависимость, введем параметры  $n_1 = h/\lambda$  и  $n_2 = D/h$ ,  $n_3 = t$ . Тогда функция приобретает следующий вид:  $F_{\text{под}} = f(n_1, n_2, n_3)$

Для установления точных формул, позволяющих определить конкретное значение данной силы в конкретную фазу волны, требуется проведение серий экспериментов.

### Результаты экспериментальных исследований

Лабораторные исследования проводились в лаборатории гидравлики Российского университета дружбы народов (рис. 2).

Экспериментальная установка размещалась в волновом лотке Armfield, позволяющем создавать регулярное волнение, где находился грунтовый лоток длиной 95 см и глубиной 16,5 см. В эксперименте использовался мелкий песок со средней крупностью 0,2 мм.

На рис. 3 показана принципиальная схема лабораторной установки. Модель трубопровода изготавливалась из трубок диаметром 25 мм. Длина трубок была подобрана по ширине экспериментального лотка и равнялась 295 мм. За счет внутреннего заполнения трубок их вес подбирался равным выталкивающей силе, то есть модельные трубки имели «нулевую» плавучесть.



**Рис. 2.** Экспериментальная установка (фото Е. Корнеевой)  
**Figure 2.** Experimental setup (photo by E. Korneeva)

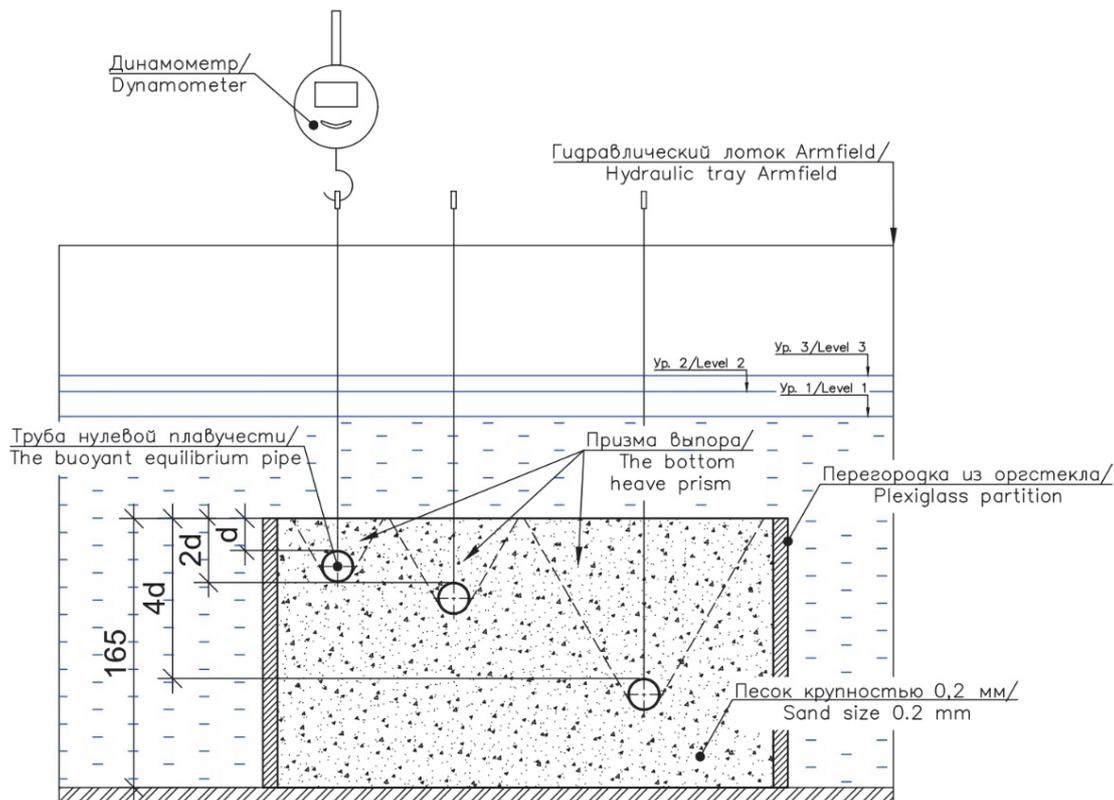


Рис. 3. Схема выполнения эксперимента  
Figure 3. Experimental scheme

Модельные трубки погружались на три различные глубины, равные: 1 – диаметру трубки; 2 – двум диаметрам трубки; 3 – четырем диаметрам трубки, что позволяло установить зависимость влияния волновой нагрузки в зависимости от глубины погружения в грунт.

Устойчивость модельных трубок в грунте измерялась с помощью динамометра при их извлечении. На первом этапе определялась устойчивость трубок при отсутствии волнения. Сравнение данного значения усилия с усилиями при волновом воздействии позволяет определить влияние волнения на устойчивость заглубленного трубопровода.

Влияние волн на устойчивость модельных трубок выполнялось в серии экспериментов, в которых высота волны менялась от 0,1 до 0,2 м с шагом 0,05 м. Длина волны варьировалась от 0,40 до 0,75 м. Толщина водного слоя над поверхностью грунта менялась от 16,5 до 7,5 см.

В результате проведенных экспериментов получены данные, позволяющие оценить влияние волнения на устойчивость трубы, заглубленной в грунт.

На рис. 4 продемонстрирована зависимость удерживающей силы от вышележащего слоя грунта от крутизны волны. На этом графике отчетливо видно, что при различных характеристиках волны величина выдергивающей силы может как увеличиваться, так и уменьшаться по сравнению с величинами, снятыми без волнового воздействия. Также этот график показывает, что при заглублении трубы в грунт, равном диаметру трубы, грунт практически не влияет на устойчивость.

Для оценки влияния грунта на устойчивость трубы под действием волн введем параметр, показывающий приращение выдергивающей силы:

$$\Delta = \frac{F_{\text{дин}} - F_{\text{стат}}}{F_{\text{стат}}},$$

где  $F_{\text{дин}}$  – величина выдергивающей силы при волновом воздействии;  $F_{\text{стат}}$  – величина выдергивающей силы без волнового воздействия.

На рис. 5 показан график, на котором значение 0 является условно статическим. Условно статическим мы называем измеренное значение выдергивающей силы в спокойной воде.

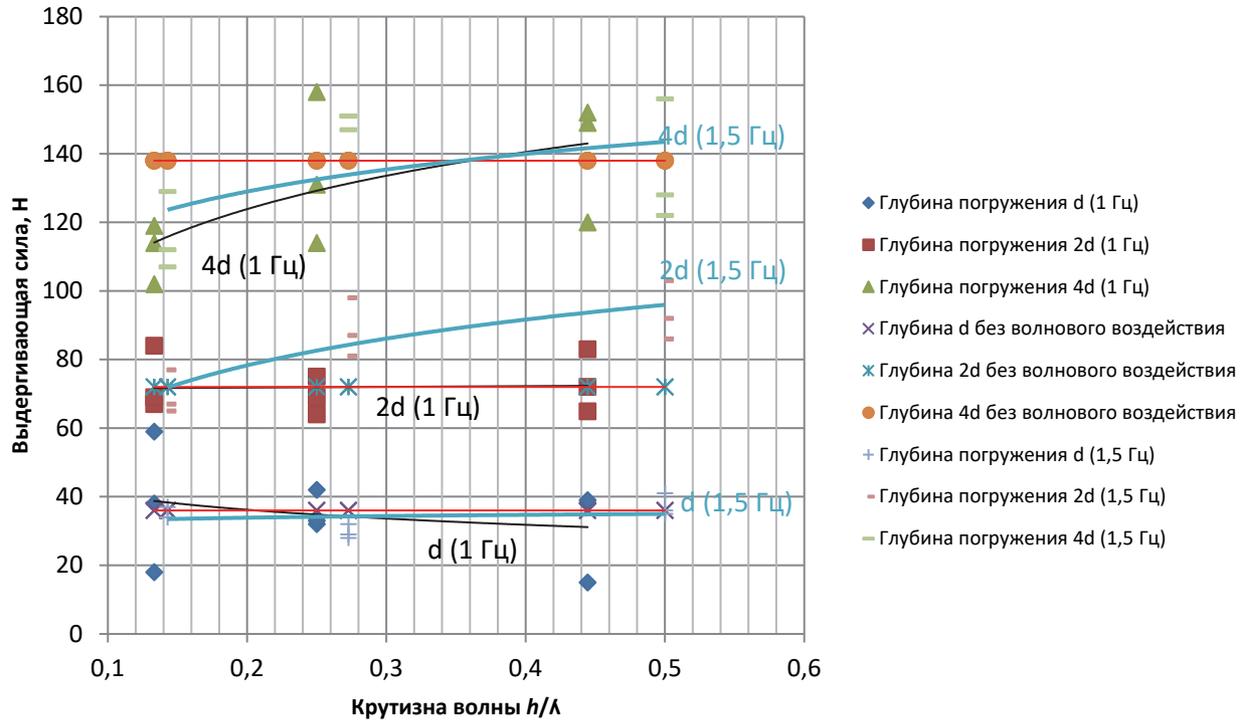


Рис. 4. Зависимость величины выдергивающей силы от крутизны волны

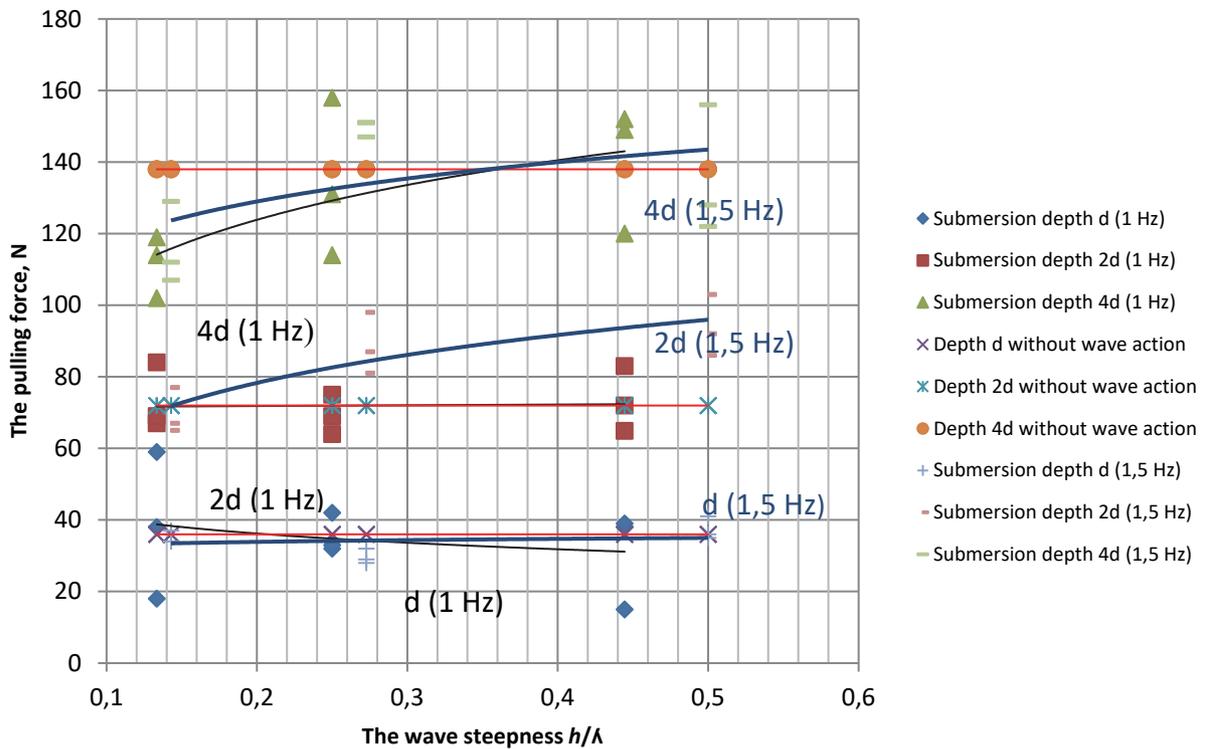


Figure 4. Dependence of the amount of the pulling force on the wave steepness

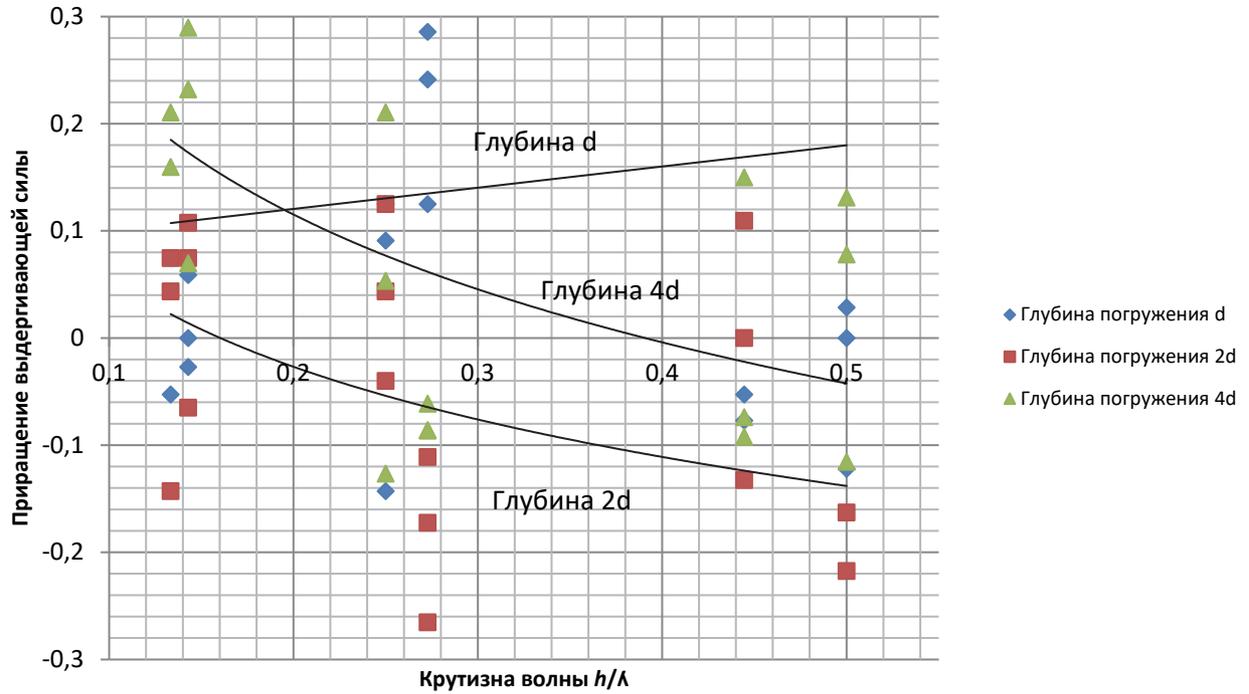


Рис. 5. Зависимость величины приращения выдергивающей силы от крутизны волны

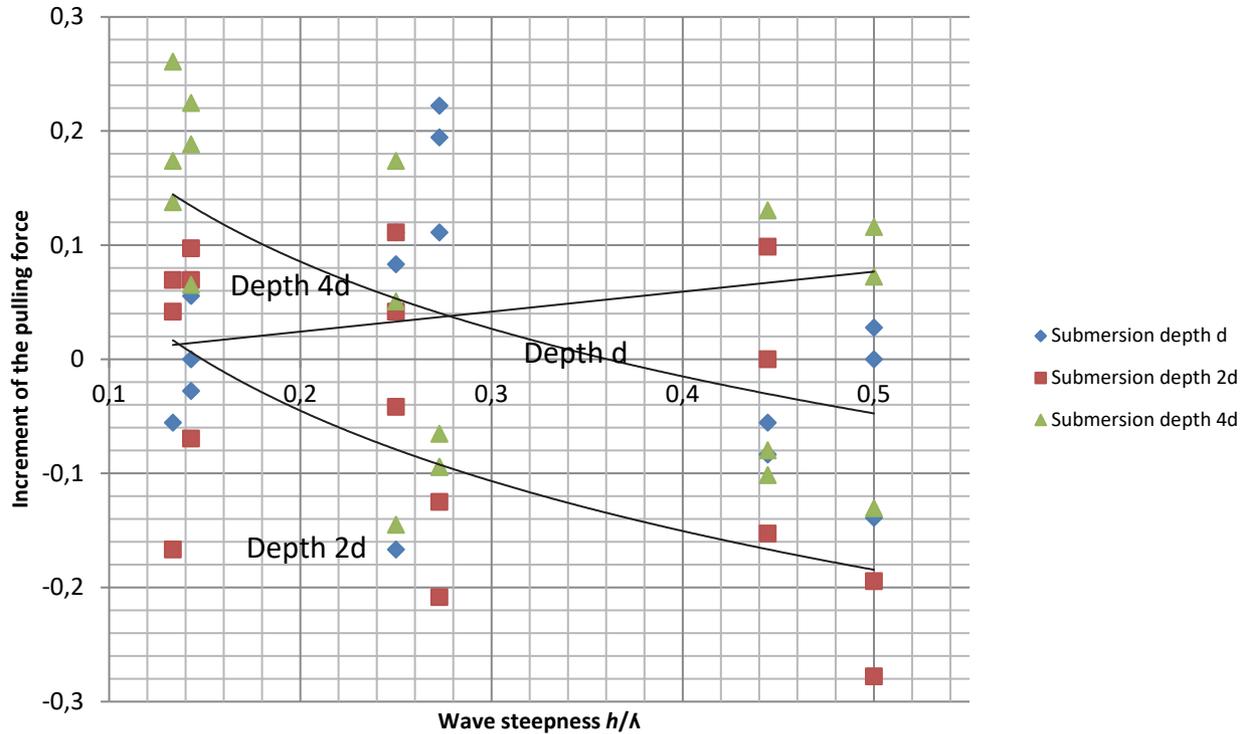


Figure 5. Dependence of the amount of the increment of the pulling force on the wave steepness

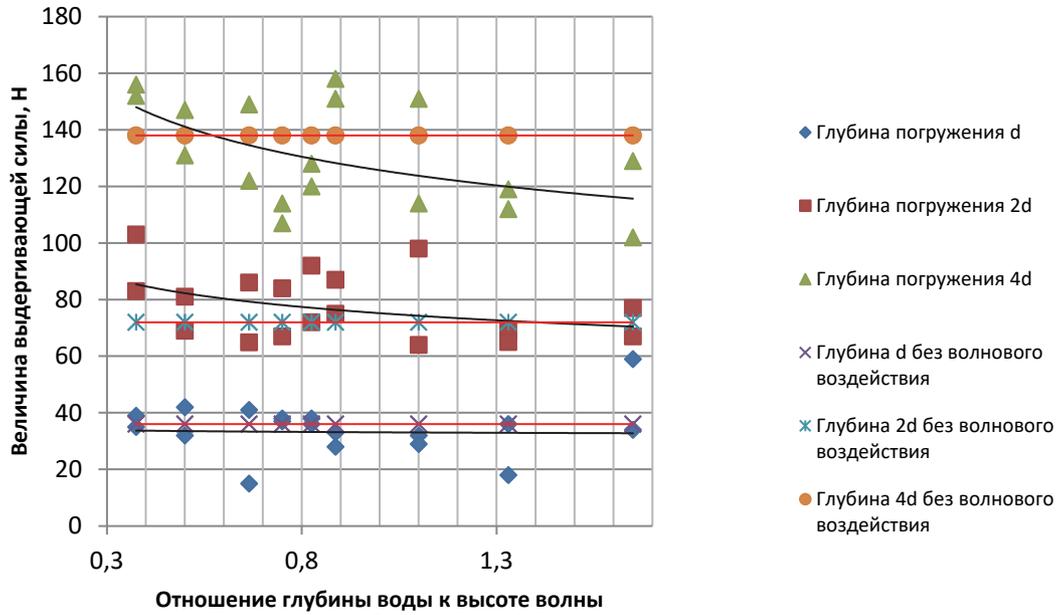


Рис. 6. Зависимость величины выдергивающей силы от отношения глубины воды к высоте волны,  $d/h$

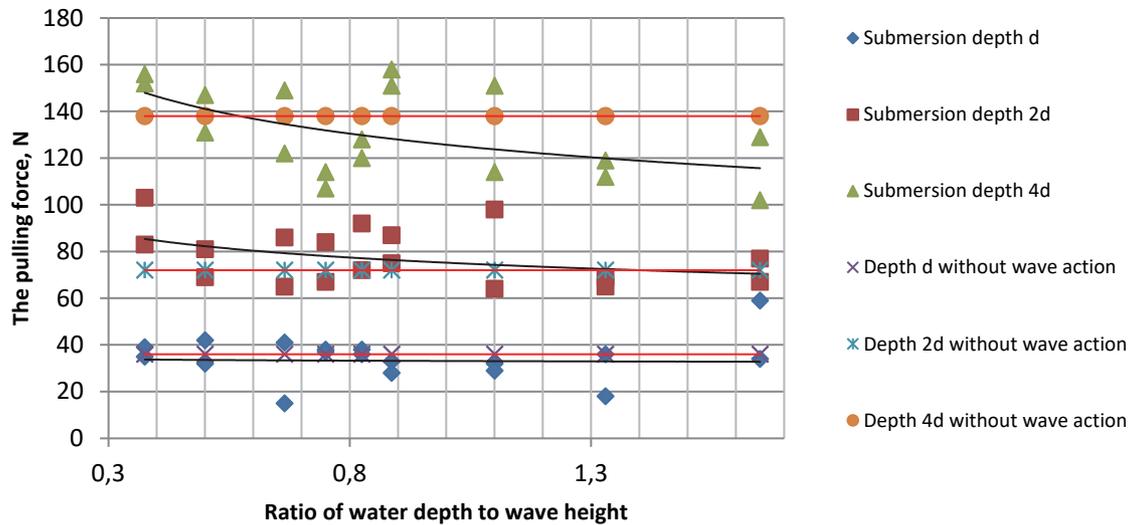


Figure 6. Dependence of the amount of the pulling force on the ratio of water depth to wave height,  $d/h$

По данным графика можно сделать вывод, что на малых глубинах значение выдергивающей силы с ростом крутизны волны увеличивается, а на больших глубинах уменьшается. Это связано с влиянием разрушения волн при малых глубинах. Следовательно, влияние волнового нагруже-

ния в наибольшей степени зависит от разжижения грунтов при глубинах, больших, чем критические, при которых наблюдается обрушение волн.

Данное утверждение хорошо видно по зависимости удерживающей силы от отношения глубины воды к высоте волн.

График на рис. 6 показывает, что при увеличении отношения глубины воды к высоте значению удерживающей силы значительно снижается, а значит, в наибольшей степени влияние волн на устойчивость трубопровода сказывается при глубинах, больших, чем глубины обрушения волн.

## Заключение

Проведенная серия экспериментов позволяет сделать вывод, что волновое нагружение в мелководной зоне оказывает влияние на устойчивость трубопроводов. Увеличение высоты волны и ее крутизны приводит к повышению взвешивающих сил, действующих на трубопровод. Также установлено, что это влияние практически не сказывается на трубопроводах низкого заложения, но увеличивается для более заглубленных трубопроводов, что говорит о возможном разжижении грунтов, расположенных выше трубопровода. Данное влияние в наибольшей степени сказывается на глубинах больших, чем глубины обрушения.

## Список литературы

1. Zhao E., Qu K., Mu L., Kraatz S., Shi B. Numerical study on the hydrodynamic characteristics of submarine pipelines under the impact of real-world tsunami-like waves // *Water*. 2019. Vol. 11. No. 2. 221. <https://doi.org/10.3390/w11020221>
2. Huang B., Liu J., Lin P., Ling D. Uplifting behavior of shallow buried pipe in liquefiable soil by dynamic centrifuge test // *Hindawi Publishing Corporation Scientific World Journal*. 2014. 838546. <https://doi.org/10.1155/2014/838546>
3. Magda W., Maeno S., Nago H. Flootation of buried submarine pipeline under cyclic loading of water pressure – numerical and experimental studies // *Journal of the Faculty of Environmental Science and Technology*. 2001. Vol. 691. Pp. 105–120. [https://doi.org/10.2208/jscej.2001.691\\_105](https://doi.org/10.2208/jscej.2001.691_105)
4. Сарычев И.Л., Кузьбожев А.С., Бирилло И.Н., Маянц Ю.А., Елфимов А.В. Исследование причин изменения начального положения подводного перехода газопровод // *Вести газовой науки*. 2020. № S1 (43). С. 78–86.
5. Мансуров М.Н., Лаптева Т.И., Копалева Л.А. Влияние донных наносов и дампинга грунта на устойчивость морских подводных трубопроводов // *Вести газовой науки*. 2013. № 3 (14). С. 119–124.
6. Ясин Э.М., Черников В.И. Устойчивость подземных трубопроводов. М.: Недра, 1967. 120 с.
7. Ясин Э.М., Березин В.Л., Рацпенкин К.Е. Надежность магистральных трубопроводов. М.: Недра, 1972. 183 с.

8. Беляев Н.Д., Лебедев В.В., Алексеева А.В., Нуднер И.С., Семенов К.К., Щемелин Д.И. Исследования изменений структуры грунта при воздействии волн цунами на гидротехнические сооружения // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2017. Т. 10. № 4. С. 44–53.

9. Торгов В.В., Цимбельман Н.Я. Изменение физико-механических свойств грунтов при сейсмическом воздействии // *Вологодские чтения*. 2008. № 70. С. 7–8.

10. Вознесенский Е.А. Землетрясения и динамика грунтов // *Соросовский образовательный журнал*. 1998. № 2. С. 101–108.

11. Гилёв Е.Е., Шубин С.Н., Боровков А.И., Абрамян А.К. Моделирование гидродинамического воздействия на подводный газопровод в траншее с разжиженным грунтом // *Вычислительная механика сплошных сред*. 2011. Т. 4. № 3. С. 41–47.

12. Sumer B.M., Truelsen C., Fredsøe J. Liquefaction around pipelines under waves // *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*. 2006. Vol. 132. No 4. Pp. 266–275. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(2006\)132:4\(266\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(2006)132:4(266))

13. Sumer B.M., Hatipoglu F., Fredsøe J., Ottesen Hansen N-E. Critical flotation density of pipelines in soils liquefied by waves and density of liquefied soils // *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*. 2006. Vol. 132. No 4. Pp. 252–265. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(2006\)132:4\(252\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(2006)132:4(252))

14. Зуйков А.Л. Гидравлика. М.: МГСУ, 2014.

## References

1. Zhao E, Qu K, Mu L, Kraatz S, Shi B. Numerical study on the hydrodynamic characteristics of submarine pipelines under the impact of real-world tsunami-like waves. *Water*. 2019;11(2):221. <https://doi.org/10.3390/w11020221>
2. Huang B, Liu J, Lin P, Ling D. Uplifting behavior of shallow buried pipe in liquefiable soil by dynamic centrifuge test. *Hindawi Publishing Corporation Scientific World Journal*. 2014;838546. <https://doi.org/10.1155/2014/838546>
3. Magda W, Maeno S, Nago H. Flootation of buried submarine pipeline under cyclic loading of water pressure – numerical and experimental studies. *Journal of the Faculty of Environmental Science and Technology*, 2001;(691):105–120. [https://doi.org/10.2208/jscej.2001.691\\_105](https://doi.org/10.2208/jscej.2001.691_105)
4. Sarychev IL, Kuzbozhev AS, Birillo IN, Mayanc YuA, Elfimov AV. Investigation of the reasons for changing the initial position of the gas pipeline underwater crossing. *Vesti Gazovoy Nauki*. 2020;(S1(43)):78–86. (In Russ.)
5. Mansurov MN, Lapteva TI, Kopaeva LA. Influence of bottom sediment and soil dumping on the stability of offshore subsea pipelines. *Vesti Gazovoy Nauki*. 2013;(3(14)):119–124. (In Russ.)
6. Yasin EM, Chernikin VI. *Stability of underground pipelines*. Moscow: Nedra Publ.; 1967. (In Russ.)

7. Yasin EM, Berezin VL, Rashchepkin KE. *Reliability of main pipelines*. Moscow: Nedra Publ.; 1972. (In Russ.)
8. Belyayev ND, Lebedev VV, Alekseyeva AV, Nudner IS, Semenov KK, Shchemelinin DI. Studies of changes in soil structure under the influence of wave tsunamis on hydraulic structures. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2017;10(4):44–53.
9. Torov VV, Cimbelman NYa. Change in the physical and mechanical properties of the soils under seismic impact. *Vologdinskije Chteniya*. 2008;(70):7–8. (In Russ.)
10. Voznesenskiy YeA. Earthquakes and soil dynamics. *Sorosovskiy Obrazovatel'nyy Zhurnal*. 1998;(2):101–108.
11. Gilyov EE, Shubin SN, Borovkov AI, Abramyan AK. Modeling of hydrodynamic impact on underwater gas pipeline in a trench with liquefied soil. *Computational Continuum Mechanics*. 2011;4(3):41–47. (In Russ.)
12. Sumer BM, Truelsen C, Fredsøe J. Liquefaction around pipelines under waves. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*. 2006;132(4):266–275. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(2006\)132:4\(266\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(2006)132:4(266))
13. Sumer BM, Hatipoglu F, Fredsøe J, Ottesen Hansen N-E. Critical flotation density of pipelines in soils liquefied by waves and density of liquefied soils. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*. 2006;132(4):252–265. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(2006\)132:4\(252\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(2006)132:4(252))
14. Zuykov AL. *Hydraulics*. Moscow: MGSU Publ.; 2014. (In Russ.)

#### Сведения об авторах

**Мордвицев Константин Петрович**, кандидат технических наук, доцент департамента строительства, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6. ORCID: 0000-0002-3519-3960, eLIBRARY SPIN-код: 5476-8995. E-mail: mkp58@yandex.ru

**Корнеева Екатерина Михайловна**, магистрант, департамент строительства, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6. ORCID: 0000-0002-8059-7630. E-mail: korneeva.e.m@yandex.ru

#### About the authors

**Konstantine P. Mordvintsev**, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Construction Department, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-3519-3960, eLIBRARY SPIN-code: 5476-8995. E-mail: mkp58@yandex.ru

**Ekaterina M. Korneeva**, master student, Construction Department, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-8059-7630. E-mail: korneeva.e.m@yandex.ru