



DOI: 10.22363/2312-8143-2021-22-1-113-121
УДК 626.01

Научная статья / Research article

Устойчивость подводного трубопровода при воздействии течения и волн

Мордвинцев К.П., Гогин А.Г., Е.М. Корнеева*

Российский университет дружбы народов,
Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6
*E-mail: korneeva.e.m@yandex.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 28 марта 2021 г.
Доработана: 20 мая 2021 г.
Принята к публикации: 30 мая 2021 г.

Ключевые слова: морской подводный трубопровод, устойчивость трубопровода, балластировка трубопровода

Аннотация. В последние десятилетия трубопроводы пользуются повышенным спросом за счет экономичности, безопасности и экологичности транспортировки. Их протяженность может насчитывать многие сотни и тысячи километров. Большое распространение получили морские трубопроводы. Их строительство должно соответствовать требованиям нормативной документации. Однако даже это не может гарантировать отсутствие проблем в процессе эксплуатации. В данной работе собраны материалы различных исследований, связанных с проблемой всплытия подводных трубопроводов. Подводные трубопроводы подвержены вертикальным подвижкам (всплытию). Во избежание подобной ситуации используется метод балластировки трубопровода. Эта статья содержит информацию, показывающую, какие исследования уже проводились, какие выводы были сделаны и показывает направления для дальнейших изысканий. В данной работе рассматривается балластировка пригрузочными мешками. Выполняются вычисления, требуемые для правильного подбора веса мешков, описываются возможные причины всплытия. Данная работа будет полезна проектировщикам подводных морских трубопроводов.

Для цитирования

Мордвинцев К.П., Гогин А.Г., Корнеева Е.М. Устойчивость подводного трубопровода при воздействии течения и волн // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2021. Т. 22. № 1. С. 113–121. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2021-22-1-113-121>

© Мордвинцев К.П., Гогин А.Г., Корнеева Е.М., 2021



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Submarine pipeline stability under currents and waves action

Konstantine P. Mordvintsev, Alexander G. Gogin, Ekaterina M. Korneeva*

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University),
6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation
*E-mail: korneeva.e.m@yandex.ru

Article history

Received: March 28, 2021

Revised: May 20, 2021

Accepted: May 30, 2021

Abstract. Pipelines are widely used in recent decades because their eco-friendliness, safety and profitability of transportation. Their length can be more than hundreds and thousands of kilometers. Submarine pipelines got wide distribution. Their constructing must comply with regulatory documents. But even it can't guarantee no problems during operation. This study contains review of the different research, connected with floating of a submarine pipeline problem. Information about conducted research and their conclusions is summarized in this paper. Direction for the future investigations is shown. Submarine pipelines are subjected to vertical movement (floating). Pipeline ballasting method is used to avoid this situation. Ballasting by loading bags is considered in this article. This study contains review of the different research, connected with floating of a submarine pipeline problem. Calculations required for the correct selection of the loading bags weight are performed, possible reasons for floating are described. This article will be useful for submarine pipeline designers.

Keywords: submarine pipeline, pipeline stability, ballasting pipeline

For citation

Mordvintsev KP, Gogin AG, Korneeva EM. Submarine pipeline stability under currents and waves action. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2021;22(1):113–121. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2021-22-1-113-121>

Введение

Трубопроводный транспорт является самым дешевым способом доставки различных жидких и газообразных материалов потребителям. Поэтому он получил широкое распространение. Протяженность трубопроводов составляет сотни и тысячи километров. Трасса трубопровода пересекает различные водные преграды: реки, болота, моря. Трубопроводы, проложенные по дну морей, относят к отдельной категории, называемой морскими трубопроводами. Наиболее широко морские трубопроводы используются при освоении месторождений, расположенных на шельфе морей. В качестве примера можно назвать систему трубопроводов, расположенных на шельфе Охотского моря, месторождение в Карском море (Варандей-море), Северный поток-1, Северный поток-2, Южный поток и др.

Строительство трубопроводов по дну морей требует учета множества внешних факторов, воздействующих на подводные трубопроводы, которые влияют на его устойчивость, прочность и надежность. На глубокой воде основное воздействие, влияющее на устойчивость трубопровода это сила Архимеда. В нормативной документации воздействие данной силы рекомендуется компенсировать дополнительным утяжелением трубопровода с помощью обетонирования трубы. Как правило, этого достаточно для обеспечения устойчивости трубопровода на глубокой воде. Однако в условиях мелководья, исходя из опыта эксплуатации трубопроводов, можно сделать вывод, что обетонирование трубопроводов не обеспечивает его устойчивость. Потеря устойчивости трубопровода в мелководной зоне морей выражается его всплытием.

Одним из способов обеспечения устойчивости трубопровода на мелководье является погружение

трубопровода в траншее на глубину до 4 м. Такая мера связана еще и с ледовой экзарацией морского дна для морей северных широт.

Основной особенностью мелководной зоны является волновое воздействие на дно моря. Этому вопросу посвящено большое количество исследований, рассматривающих различные аспекты этого процесса.

В данной статье собран обзор различных источников, занимающихся проблемами всплытия морских трубопроводов, а также рассматривается проблема возврата всплывшего трубопровода в проектное положение.

1. Изучение влияния волн больших периодов (цунами) на морские трубопроводы

В результате компьютерного моделирования было установлено следующее: после того как волна цунами прошла трубопровод, размер завихрений воды на передней и задней сторонах трубопровода существенно увеличилась. После прохождения через трубопровод высота волны уменьшилась. Также было обнаружено, что гидродинамические силы в подводных трубопроводах могут сильно зависеть от высоты волны, глубины воды и диаметра трубопровода. Однако максимальная горизонтальная сила уменьшается с увеличением глубины воды и расстояния между трубопроводом и морским дном.

На морских нефтяных месторождениях подводные трубопроводы прокладываются по морскому дну с различной топографией. При проектировании подводных трубопроводов следует учитывать топографию морского дна. Если поверхность неровная, в трассе трубопровода могут пролегать свободные пролеты с неподдерживаемыми участками. Если такой участок является слишком длинным, то возникающее изгибающее напряжение может быть чрезмерным. Влияние подводных вихрей, вызванных волной цунами, может вызвать серьезные деформации на подобных участках.

2. Изучение влияния сейсмической нагрузки на морские трубопроводы

Сейсмическая нагрузка служит причиной для разжижения грунта, из-за которого морской трубопровод

может всплыть. В данном исследовании проводилось изучение подъемной силы, которая возникает из-за разжижения грунтов при сейсмической нагрузке, смоделированной на виброплатформе с помощью центрифуги [2].

Для эксперимента были использованы центрифуга ZJU400 и виброплатформа. Для имитации трубопровода была использована алюминиевая труба плотностью $2,7 \text{ г/см}^3$, длиной 390 мм, толщиной 4 мм и внешним диаметром 40 мм.

В результате было обнаружено, что начальный и конечный момент подъема трубы не связаны напрямую с сейсмическим движением. Поднятие сильно зависит от нарастания избыточного порового давления (разжижение грунта). Подъем трубы — это комбинация нескольких сил. Во время сейсмической вибрации создается избыточное поровое давление, грунт вокруг трубопровода постепенно растекается в форме овала, что вызывает как изменение веса перекрывающего грунта, так и несущую способность грунта, лежащего под трубопроводом. В результате равновесие трубопровода во время вибрирования нарушается, и, как следствие, труба поднимается вверх.

Волны на поверхности воды, особенно возникающие во время шторма, могут вызывать высокоамплитудные колебания порового давления, которое возникает в песчаных донных отложениях, что, в свою очередь, может увеличивать гидродинамическую подъемную силу, действующую на подводный трубопровод, одновременно уменьшая силы сопротивления, тем самым влияя на возможность всплытия трубопровода.

3. Изучение влияния волновой нагрузки на морские трубопроводы

В данном исследовании моделировалось вертикальное перемещение морского трубопровода, погруженного в песчаные грунты морского дна под действием волновой нагрузки, вызванной гармоническими колебаниями водной поверхности [3].

Установка для динамических испытаний состоит из прямоугольного контейнера со следующими параметрами: $L_c = 1,0 \text{ м}$ (длина), $H_c = 0,7 \text{ м}$ (высота), $B_c = 0,4 \text{ м}$ (ширина). Контейнер заполнен влагонасыщенным песком. Толщина песчаного слоя составляет $H_s = 0,6 \text{ м}$. На верхней части песчаного контейнера

устанавливается столб воды, совершающий колебания, уровень воды в котором составляет 1,2 м от песчаной поверхности. Вертикальные колебания поверхности столба воды генерируются подачей колебательного давления воздуха, воздействующего на поверхность воды. Цилиндрический элемент повышенной стойкости к деформациям погружается в песчаный контейнер параллельно его длинной стороне. Внешний диаметр трубы составляет 0,1 м, длина — 0,38 м. В ходе эксперимента труба погружается на три разные глубины: 0,025, 0,050, 0,075 м.

Изменение порового давления около трубы в течение одного периода колебания воды было измерено. Используя простую интеграцию гидродинамического порового давления по линии окружности трубы, была вычислена гидродинамическая подъемная сила, $F_p = 0,1$ кН/м, которая возникает во время максимального состояния падения водного давления, приложенного на поверхность песка

В результате проведения эксперимента были получены следующие данные: труба медленно поднимается в течение первых 25 минут, после чего заметно ускоряется. Труба достигает границы песка спустя 53 минуты после начала теста.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что результирующая гидродинамическая вертикальная сила возникает при изменении порового давления и имеет колебательный характер. Чем больше время действия и амплитуда гидродинамической вертикальной силы, тем короче время всплытия трубопровода.

4. Изучение воздействия донных наносов на морские трубопроводы

Прибрежная зона характеризуется подвижностью донных грунтов при волновом воздействии. В такой ситуации донные отложения формируют поток наносов. Перенос наносов может играть значительную роль в процессе эксплуатации трубопровода. Согласно наблюдениям ученых, при формировании потока наносов грунты частично теряют связность и переходят во взвешенное состояние [6]. Таким образом, меняется плотность жидкости, в котором располагается трубопровод, что приводит к изменению величины силы Архимеда и, как следствие, всплытию трубопровода. Решением этой проблемы могут быть

дополнительные расчеты, учитывающие разницу масс, которую в целях обеспечения устойчивого положения морского трубопровода необходимо компенсировать. Для решения данной проблемы активно используется метод балластировки.

5. Методика определения величины пригрузки заглубленного трубопровода грунтом

На заглубленный трубопровод в первую очередь оказывает влияние масса грунта, находящегося над ним. Для того чтобы оценить эффективность пригрузки трубопровода забетонированными мешками, вначале необходимо рассчитать усилие анкеровки в грунте самого трубопровода.

При расположении трубопровода в грунте возможны различные схемы его взаимодействия с окружающим массивом грунта [7]:

- а) продольное перемещение трубопровода в грунте;
- б) поперечное перемещение трубопровода в грунте по горизонтали;
- в) поперечное перемещение трубопровода в грунте по вертикали (при этом возможны перемещения как вниз в сторону непо потревоженного грунта, так и вверх, в сторону грунта засыпки);
- г) кручение трубопровода в грунте.

Причины и процесс перемещения трубы в грунте вверх трудно поддаются теоретическому анализу, поэтому в основном изучаются эмпирическими методами. Так, в работах Э.М. Ясина [8, 9] и П.П. Бородавкина [10] представлены некоторые результаты экспериментальных исследований.

В книге А.Б. Айбиндера [11] описаны эксперименты, в которых расположенная в грунте труба нагружалась прессовой нагрузкой. В результате были получены зависимости сопротивления грунта перемещению. Для испытаний использовались отрезки трубы длиной 4 м с различными диаметрами 273, 529 и 720 мм, заглубленные в грунт. Для подъема труб использовались лебедки, натягивающие тросы, закрепленные в трубах. Для замера усилий натяжения тросов использовались динамометры, а для измерения перемещений — прогибомеры. Нагружение производилось шагами, причем на каждом шаге подъема осуществлялась выдержка для

того, чтобы усилия в тросе стабилизировались. Высота засыпки в экспериментах изменялась от 0 до 1 м, а для засыпки использовались различные виды грунтов. В процессе экспериментов было установлено, что зависимость сопротивления грунта от перемещения трубы практически одинакова. При малых перемещениях у сопротивление грунта q_y зависит от перемещения практически линейно, а затем, по мере увеличения перемещения, линейность нарушается, причем после достижения максимальной величины сопротивление грунта начинает уменьшаться.

Величина предельной удерживающей способности грунта, т.е. его сопротивления, соответствующего потере устойчивости грунта, зависит от призмы выпора (рис. 1, а, б). Учитывая, что заложение трубопровода относительно его диаметра невелико, можно принять, что угол откоса призмы выпора определяется углом внутреннего трения грунта. Предельное сопротивление грунта перемещению трубы вверх может быть определено из выражения [11]

$$q_{\text{пр.гр}} = \gamma_{\text{гр}} D_{\text{н}} (h_0 - 0.39 D_{\text{н}}) + \gamma_{\text{гр}} h_0^2 \tan 0.7 \varphi_{\text{гр}} + \frac{0.7 c_{\text{гр}} h_0}{\cos 0.7 \varphi_{\text{гр}}}, \quad (1)$$

где $\varphi_{\text{гр}}$ — угол внутреннего трения грунта; $c_{\text{гр}}$ — удельное сцепление грунта; $\gamma_{\text{гр}}$ — удельный вес грунта; $D_{\text{н}}$ — наружный диаметр трубопровода; h_0 — расстояние от верха засыпки до оси трубы.

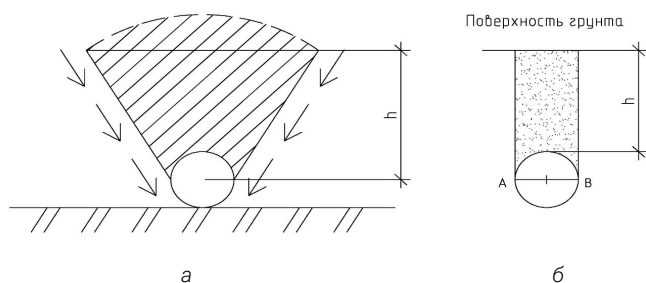


Рис. 1. Схема взаимодействия трубопровода с грунтом: а — для формулы (1); б — для формулы (2)

Figure 1. Diagram of the interaction of the pipeline with the ground: а — for the formula (1); б — for the formula (2)

В настоящее время построен ряд моделей взаимодействия грунта с трубопроводом, систематизированные в [12]. Анализ и сравнение этих моделей между собой было проведено в [13]. По заключению автора, наиболее подходящей моделью взаимодействия грунта

с трубопроводом является модель, представленная в [14; 15], и согласно которой величина удерживающей силы от грунта, лежащего выше трубопровода, может быть определена по формуле

$$q_{\text{гр}} = \gamma_{\text{гр}} D_{\text{н}} (h + 0.1073 D_{\text{н}}). \quad (2)$$

Выражение (2) по смыслу соответствует первому слагаемому в формуле (1) и позволяет получить пригрузку от грунта на трубопровод без учета трения и сцепления по поверхности призмы выпора (рис. 2).

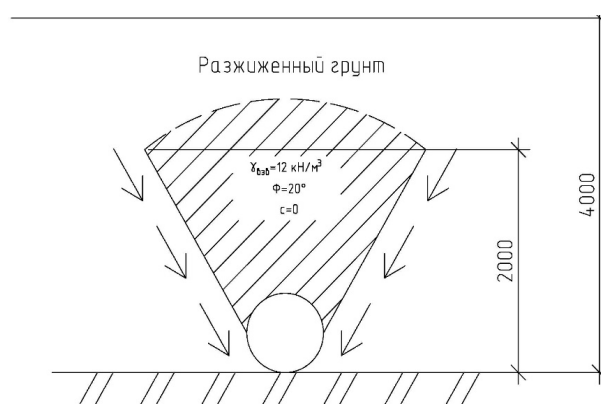


Рис. 2. Поверхность призмы выпора
Figure 2. Thrust prism surface

6. Механизмы разжижения грунта вокруг заглубленного трубопровода

Расчетный случай с заглубленным трубопроводом в проницаемых грунтах с колебаниями частиц грунта вокруг трубопровода под действием волн и соответствующих колебаний самого трубопровода является одним из наиболее сложных случаев рассмотрения устойчивости трубы. Значительное увеличение порового давления может быть причиной, например, колебания грунтов морского дна, разжижения верхних слоев грунта и последующего всплытия трубопровода из-за уменьшения давления грунтов сверху.

Причиной разжижения грунтов принято считать сейсмическое воздействие, из-за чего при проектировании трубопроводов в районах низкой сейсмической опасности не рассматривается вероятность потери устойчивости трубопровода в разжиженном грунте. Механизм разжижения грунта заключается в том,

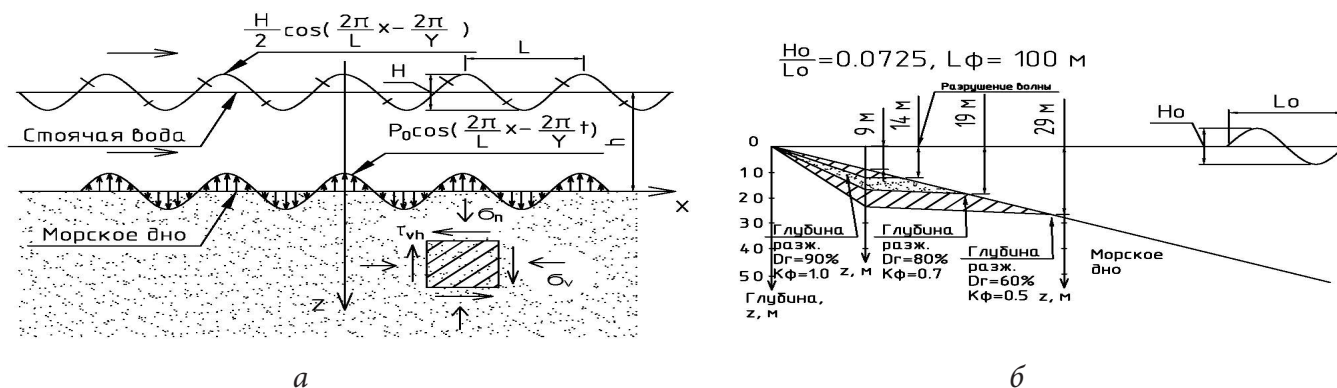


Рис. 3. Давление на морское дно при действии волн на поверхности (а); пример определения толщины грунта, подверженного разжижению, при действии волн длиной 100 м (б) [23]

Figure 3. Seabed pressure due to surface waves action (on the left); examples of wave-induced liquefaction analysis for shoaling seabed deposit due to wave action 100 m long (on the right) [23]

что между мельчайшими минеральными частицами грунта, в промежутках между которыми находится вода (поровая вода), разрывается часть связей и контактов, вследствие чего значительно снижается прочность этого грунта. Причин для разрыва связей между частицами и последующего разжижения грунта в контексте рассмотрения подводных трубопроводов может быть несколько: колебания частиц с разными скоростями при прохождении упругой волны, что характерно для сейсмических воздействий [16]; интенсивно повторяющееся гидродинамическое воздействие на грунт, при котором переход грунта в разжиженное состояние может происходить за несколько десятков периодов волнения [17—19]; передающиеся грунту высокочастотные колебания самого трубопровода как результат колебаний давления транспортируемого сырья [20; 21].

Согласно одной из исследовательских работ, результаты которой приведены в [22], динамическую неустойчивость при сейсмических воздействиях на шельфе острова Сахалин проявляют грунты в пределах 6—7-метровой толщи от уровня дна.

Изучение распространения напряжений в грунте морского дна при циклических перепадах давления, возникающих при распространении ветровых волн, показало, что в этом случае направления главных напряжений в грунте непрерывно меняются (вращаются), несмотря на то, что амплитуда колебаний давления остается постоянной. Это приводит к тому, что условно определяемый коэффициент циклических напряжений, показывающий степень разжижения грунта, уменьша-

ется примерно на 30 %, т.е. грунт быстрее переходит в разжиженное состояние. При этом толщина разжиженного грунта вследствие волнового воздействия может достигать 9 м во время продолжительных штормов со средней длиной волны около 100 м (рис. 3, а, б) [23].

Таким образом, разжижение некоторой толщи грунтов морского дна вблизи трубопровода с наибольшей долей вероятности явилось причиной его всплытия и оголения.

Наиболее простой путь в этом случае — принять процесс разжижения грунтов совершившимся (или частично совершившимся) и рассматривать вертикальную устойчивость трубопровода уже в разжиженном грунте. Несвязный водонасыщенный грунт превращается в тяжелую вязкую жидкость [24], что позволяет находить вес погруженного трубопровода как разницу собственного веса трубопровода и веса вытесненной трубопроводом жидкости с повышенной плотностью. Поскольку плотность разжиженного грунта будет всегда больше плотности жидкости, выталкивающая сила будет больше, что ухудшает устойчивость трубопровода. Это может рассматриваться как один из расчетных аварийных случаев потери устойчивости заглубленного трубопровода во время эксплуатации. Для определения плотности разжиженного грунта допустимо пользоваться следующим выражением:

$$\rho_{p,гр} = \frac{\rho_{ск,гр} \cdot \rho_v \cdot (1 + \omega)}{\rho_{ск,гр} \cdot \omega + 1}, \quad (3)$$

где $\rho_{ск,гр}$ — плотность скелета грунта; ρ_v — плотность воды; ω — природная влажность грунта.

В случае неустойчивости трубопровода в разжиженном грунте обычно требуется увеличение веса трубопровода путем увеличения толщины облицовки, что в настоящем случае невозможно. Согласно нормам для обеспечения устойчивости трубопровода в период эксплуатации на участке, где грунт подвержен разжижению, необходимо предусмотреть компенсационные мероприятия, такие как: замещение грунта обратной засыпки на грунт, не подверженный разжижению (щебень), устройство щебеночных перемычек.

Заключение

На сегодняшний день точная причина всплытия морских трубопроводов не установлена. Некоторые изыскатели предполагают, что причинами этого могут являться волновые или сейсмические воздействия, но единого ответа нет. Наименее изученным является влияние низкочастотного волнового нагружения. При этом проводимые исследования не учитывают волнового взвешивающего давления, воздействующего на трубопровод, которое является дополнительной силой, влияющей на устойчивость. Для решения этого вопроса требуются дополнительные эксперименты и исследования. В настоящее время используется метод избыточной балластировки, что приводит к увеличению стоимости трубопроводов. Задачей исследований в этой области должно быть определение наиболее опасных внешних воздействий, влияющих на устойчивость трубопроводов, и разработка наиболее экономичных решений, обеспечивающих устойчивость трубопроводов.

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: Article ID 838546. <https://doi.org/10.1155/2014/838546>
3. Magda W., Maeno S., Nago H. Floation 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. P. 105-120. 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 // *Научно-технический сборник. Вестн. газовой науки*. 2020. № S1 (43). С. 78—86.
5. РАО «ГАЗПРОМ» СП 107-34-96 Балластировка, обеспечение устойчивости положения газопроводов на проектных отметках. М., 1996. 47 с.
6. Мансуров М.Н., Лаптева Т.И., Конаева Л.А. Влияние донных наносов и дампинга грунта на устойчивость морских подводных трубопроводов // *Вести газовой науки*. 2013. № 3 (14). С. 119-124.
7. Наумова Г.А. Расчет трубопроводных конструкций с эксплуатационными повреждениями. Волгоград: Изд-во ВолгГАСУ, 2009. 184 с.
8. Ясин Э.М., Черников В.И. Устойчивость подземных трубопроводов. М.: Недра, 1967. 120 с.
9. Ясин Э.М., Березин В.Л., Ращепкин К.Е. Надежность магистральных трубопроводов. М.: Недра, 1972. 183 с.
10. Бородавкин П.П. Механика грунтов. М.: Недра, 2003. 349 с.
11. Айнбиндер А.Б. Расчет магистральных и промышленных трубопроводов на прочность и устойчивость: справочное пособие. М.: Недра, 1991. 287 с.
12. Идрисова Я.Р. Выбор модели взаимодействия с грунтом при оценке напряженно-деформированного состояния // *Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов*. 2014. № 2 (96). С. 126—133.
13. Идрисова Я.Р. Обеспечение безопасной эксплуатации магистральных нефте- и нефтепродуктопроводов на участках многолетнемерзлых грунтов: дис. ... к.т.н. Уфа, 2015. 98 с.
14. Бабин Л.А., Быков Л.И., Волохов В.Я. Типовые расчеты по сооружению трубопроводов. М.: Недра, 1979. 176. С. 57.
15. Таран В.Д. Сооружение магистральных трубопроводов. М.: Недра, 1964. 544 с.
16. Вознесенский Е.А. Землетрясения и динамика грунтов // *Соросовский образовательный журнал*. 1998. № 2. С. 101—108.
17. 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.
18. Sumer B.M., Truelsen C., Fredsøe J. Liquefaction around pipelines under waves // *J. Waterw. port, coastal, Ocean Eng. American Society of Civil Engineers*. 2006. Vol. 132. № 4. P. 266—275.

19. 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 // *J. Waterw. port, coastal, Ocean Eng. American Society of Civil Engineers*. 2006. Vol. 132. № 4. P. 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))
20. Прокофьев А.Б., Шахматов Е.В., Миронова Т.Б. Математическая модель колебаний трубопроводов от действия пульсирующего потока жидкости // *Судостроение*. 2011. № 2. С. 39—42.
21. Воронин К.С. Прогнозирование развития поврежденных на магистральных газопроводах под воздействием динамической нагрузки: дис. ... к.т.н. 2013.
22. Ishihara K., Yamazaki A. Analysis of wave-induced liquefaction in seabed deposits of sand // *Soils and Foundations*. 1984. Vol. 24. № 3. С. 85—100.
23. Новиков А.И., Новиков А.А., Голубин С.И., Савельев К.Н. Особенности проведения инженерных изысканий при определении потенциала разжижения грунтов в основании объектов морской добычи шельфа острова Сахалин (Россия) // *Газовая промышленность*. 2018. Т. 765. № 3. С. 18—25.
24. Торов В.В., Цимбельман Н.Я. Изменение физико-механических свойств грунтов при сейсмическом воздействии // *Вологдинские чтения*. 2008. № 70. С. 7—8
- position of gas pipelines at the design marks]. Moscow; 1996. (In Russ.)
6. Mansurov MN, Lapteva TI, Kopaeva LA. Vliyanie donnyh nanosov i dampinga grunta na ustojchivost' morskikh podvodnyh truboprovodov [Influence of bottom sediment and soil dumping on the stability of offshore subsea pipelines]. *Nauchno-tekhnicheskij sbornik Vesti gazovoj nauki [Scientific and technical collection of Gas science News]*. 2013;3(14):119—124. (In Russ.)
7. Naumova GA. *Raschet truboprovodnyh konstrukcij s ekspluatacionnymi povrezhdeniyami [Calculation of pipeline structures with operational damage]*. Volgograd: Volg GASU Publ.; 2009. (In Russ.)
8. Yasin EM, Chernikin VI. *Ustojchivost' podzemnyh truboprovodov [Stability of underground pipelines]*. Moscow: Nedra Publ.; 1967. (In Russ.)
9. Yasin EM, Berezin VL, Rashchepkin KE. *Nadezhnost' magistral'nyh truboprovodov [Reliability of main pipelines]*. Moscow: Nedra Publ.; 1972. (In Russ.)
10. Borodavkin PP. *Mekhanika gruntov [Soil mechanics]*. Moscow: Nedra Publ.; 2003. (In Russ.)
11. Ajnbinder AB. *Raschet magistral'nyh i promyslovyh truboprovodov na prochnost' i ustojchivost': Spravochnoe posobie [Calculation of main and field pipelines for strength and stability: Reference manual]*. Moscow: Nedra Publ.; 1991. (In Russ.)
12. Idrisova YaR. Choice of model of the pipeline interaction with soil in assessing its stressed-strained state. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefiti i nefteproduktov [Problems of collecting, preparing and transporting oil and petroleum products]*. 2014;2(96):126—133. (In Russ.)
13. Idrisova YaR. *Obespechenie bezopasnoj ekspluatatsii magistral'nyh nefte- i nefteproduktoprovodov na uchastkah mnogoletnemerzlyh gruntov [Ensuring the safe operation of main oil and oil product pipelines in permafrost areas]*. (Thesis of Candidate of Technical Sciences). Ufa; 2015. (In Russ.)
14. Babin LA, Bykov LI, Volohov VYa. *Tipovye raschety po sooruzheniyu truboprovodov [Typical calculations for the construction of pipelines]*. Moscow: Nedra Publ.; 1979. (In Russ.)
15. Taran VD. *Sooruzhenie magistral'nyh truboprovodov [Construction of the main pipelines]*. Moscow: Nedra Publ.; 1964. (In Russ.)
16. Voznesenskij EA. *Zemletryaseniya i dinamika gruntov [Earthquakes and soil dynamics]*. *Sorosovskij obrazovatel'nyj zhurnal*. 1998;2:101—108. (In Russ.)
17. 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.)
18. Sumer B M, Truelsen C, Fredsøe J. Liquefaction around pipelines under waves. *J. Waterw. port, coastal, Ocean Eng.*

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: Article ID 838546. <https://doi.org/10.1155/2014/838546>
3. Magda W, Maeno S, Nago H. Flotation 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
4. Sarychev IL, Kuz'bozhev AS, Birillo IN, Mayanc YuA, Elfimov AV. Issledovanie prichin izmeneniya nachal'nogo polozheniya podvodnogo perekhoda gazoprovod [Investigation of the reasons for changing the initial position of the gas pipeline underwater crossing]. *Nauchno-tekhnicheskij sbornik Vesti gazovoj nauki [Scientific and technical collection of Gas science News]*. 2020;S1(43):78—86. (In Russ.)
5. RAO «GAZPROM» SP 107-34-96 *Ballastirovka, obespechenie ustojchivosti polozheniya gazoprovodov na proektnyh otmetkah [Ballasting, ensuring the stability of the*

American Society of Civil Engineers, 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))

19. 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. *J. Waterw. port, coastal, Ocean Eng. American Society of Civil Engineers*. 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))

20. Prokof'ev AB, Shahmatov EV, Mironova TB. Mathematical model of pipelines oscillation resulting from pulsing fluid flow. *Shipbuilding*. 2011;2:39—42. (In Russ.)

21. Voronin KS. *Prognozirovanie razvitiya povrezhdenij na magistral'nyh gazoprovodah pod vozdejstviem dinamicheskoy nagruzki [Predicting the development of damage on main gas pipelines under the influence of dynamic load]*. (Thesis of Candidate of Technical Sciences). 2013.

22. Ishihara K, Yamazaki A. Analysis of wave-induced liquefaction in seabed deposits of sand. *Soils and Foundations*. 1984;24(3):85—100.

23. Novikov AI, Novikov AA, Golubin SI, Saveliev KN. Specific features of engineering surveys in determining the potential of the soil liquefaction in the basis of the facilities of offshore production on the Sakhalin shelf (Russian Federation). *Gazovaya promyshlennost' [Gas industry]*. 2018;3(765):18—25. (In Russ.)

24. Torov VV, Cimbel'man NYa. *Izmenenie fiziko-mekhanicheskikh svojstv gruntov pri seismicheskom vozdejstvii [Change in the physical and mechanical properties of the soils under seismic impact]*. *Vologdinskie chteniya [Vologdinsky readings]*. 2008;70:7—8. (In Russ.)

Сведения об авторах

Мордвинцев Константин Петрович, доцент департамента строительства инженерной академии РУДН, кандидат технических наук; eLIBRARY SPIN-код: 387-741; e-mail: mkp58@yandex.ru

Гогин Александр Григорьевич, ассистент департамента строительства инженерной академии РУДН; eLIBRARY SPIN-код: 994-101, Scopus Id: 57192663878; e-mail: alex.gogin@bk.ru

Корнеева Екатерина Михайловна, студент магистратуры департамента строительства инженерной академии РУДН; e-mail: korneeva.e.m@yandex.ru

About the authors

Konstantine P. Mordvintsev, Associate Professor of the Construction Department, Academy of Engineering, RUDN University, PhD in Engineering sciences; eLIBRARY SPIN-код: 387-741; e-mail: mkp58@yandex.ru

Alexander G. Gogin, Assistant of the Construction Department, Academy of Engineering, RUDN University; eLIBRARY SPIN-code: 994-101, Scopus Id: 57192663878; e-mail: alex.gogin@bk.ru

Ekaterina M. Korneeva, Master Degree Student of the Construction Department, Academy of Engineering, RUDN University; e-mail: korneeva.e.m@yandex.ru