

DOI: 10.22363/1815-5235-2025-21-2-96-107

EDN: NESMQL

Научная статья / Research article

Расчет фильтрации воды внутрь вакуумного анкера при воздействии выдергивающего усилия

В.В. Миронов¹, Ю.А. Иванюшин¹, Д.В. Миронов²¹ Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация² ООО «ЭЛЕКТРОПАМ», Тюмень, Российская Федерация ivanjushinja@tyuiu.ru

Поступила в редакцию: 4 февраля 2025 г.

Доработана: 4 апреля 2025 г.

Принята к публикации: 14 апреля 2025 г.

Аннотация. При сооружении морских объектов требуется надежное закрепление их на донной поверхности. В мире разработано множество решений по фиксации с донной поверхностью (грузы, анкеры, якоря). Для решения данной задачи применена конструкция вакуумного анкера. Представлены принципиальные схемы вакуумных анкеров, устраиваемых в слабых грунтах. Цель исследования — обоснование работоспособности вакуумных анкеров с учетом влияния инфильтрационных процессов. Для достижения цели применялись математический аппарат, поиск и анализ отечественных и зарубежных источников с сопоставлением данных. Определение положения линий фильтрационного тока воды в проницаемом грунте выполнено методом электрогидродинамической аналогии. Произведен расчет фильтрации воды к анкеру под выдергивающей нагрузкой; определен фильтрационный расход воды в зависимости от глубины акватории в месте установки, мощности слоя водопроницаемого грунта и его коэффициента фильтрации, геометрических параметров вакуумных анкеров. Описана технология погружения воздействием вакуумных анкеров в слабый донный грунт, выполнен расчет условия погружения анкера в донный грунт и условия его выдергивания из грунта. Установлено, что вакуумные анкеры для применения в слабых донных грунтах обладают значительной удерживающей способностью при относительно небольших размерах. При этом мощность водопроницаемого слоя донного грунта, превышающая пять длин заглубления вакуумного анкера в донный грунт, практически не влияет на значение фильтрационного расхода воды внутрь вакуумного анкера при воздействии выдергивающей нагрузки на анкер. Прогнозируется снижение затрат при внедрении вакуумных анкеров в практику морского строительства.

Ключевые слова: донный грунт, инфильтрация, электрогидродинамическая аналогия, вакуумная фиксация, морские сооружения, удерживающая способность, гидротехническое строительство

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов: Авторы сделали эквивалентный вклад в проведение исследования и подготовку публикации.

Для цитирования: Миронов В.В., Иванюшин Ю.А., Миронов Д.В. Расчет фильтрации воды внутрь вакуумного анкера при воздействии выдергивающего усилия // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2025. Т. 21. № 2. С. 96–107. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2025-21-2-96-107>

Миронов Виктор Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры инженерных систем и сооружений, Тюменский индустриальный университет (ТИУ), Российская Федерация, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 38; eLIBRARY SPIN-код: 2433-2178, ORCID: 0000-0001-8939-850X; e-mail: vvmironov@list.ru

Иванюшин Юрий Андреевич, кандидат технических наук, доцент кафедры инженерных систем и сооружений, Тюменский индустриальный университет (ТИУ), Российская Федерация, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 38; eLIBRARY SPIN-код: 9869-3687, ORCID: 0000-0002-4470-6967; e-mail: ivanjushinja@tyuiu.ru

Миронов Дмитрий Викторович, кандидат технических наук, ведущий инженер; ООО «ЭЛЕКТРОПАМ», Российская Федерация, 625023, г. Тюмень, ул. Пржевальского, д. 33, корп. 1, кв. 79; eLIBRARY SPIN-код: 4565-8012, ORCID: 0009-0004-0765-5816; e-mail: dvmironov@yandex.ru

© Миронов В.В., Иванюшин Ю.А., Миронов Д.В., 2025

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

Analysis of Water Seepage into Vacuum Anchor Subjected to Pull-Out Load

Victor V. Mironov¹, Yuriy A. Ivanyushin¹✉, Dmitriy V. Mironov²

¹ Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation

² LLC “ELECTRORAM”, Tyumen, Russian Federation

✉ ivanjushinja@tyuiu.ru

Received: February 4, 2025

Revised: April 4, 2025

Accepted: April 14, 2025

Abstract. When constructing offshore facilities, their reliable fixation to the bottom surface is required. Many solutions for fixing to the bottom surface (weights and anchors) have been developed in the world. To solve this problem, it is proposed to use a vacuum anchor design. Conceptual diagrams of vacuum anchors installed in soft soils are presented. The purpose of the study is to substantiate the operability of vacuum anchors taking into account the influence of infiltration processes. To achieve this goal, mathematical techniques, search and analysis of Russian and international sources with data comparison were used. The position of the water seepage lines in permeable soil is determined by the electrohydrodynamic analogy method. Water seepage into the anchor subjected to a pull-out load was calculated; the seepage discharge of water was determined depending on the depth of the water body at the installation site, the thickness of the permeable soil layer and its permeability coefficient, and the geometric parameters of the vacuum anchors. The technology of driving vacuum anchors into soft bottom soil is described, the conditions of driving the anchor into the bottom soil and the conditions of it pulling out from the soil are calculated. It is established that vacuum anchors used for soft bottom soils have a significant retaining capacity with relatively small dimensions. At the same time, the thickness of the permeable layer of the bottom soil, exceeding five embedment lengths of the vacuum anchor into the bottom soil, practically does not affect the value of water seepage inside the vacuum anchor when subjected to a pull-out load. A reduction in costs is predicted when introducing vacuum anchors into the practice of marine construction.

Keywords: bottom soil, infiltration, electrohydrodynamic analogy, vacuum fixation, marine structures, retaining capacity, hydraulic engineering

Conflicts of interest. The authors declare that there is no conflict of interest.

Authors' contribution: The authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

For citation: Mironov V.V., Ivanyushin Yu.A., Mironov D.V. Analysis of water seepage into vacuum anchor subjected to pull-out load. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2025;21(2):96–107. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2025-21-2-96-107>

1. Введение

В морской акватории широко применяются строительные объекты с различным функциональным назначением. К таким объектам, в числе прочих, относятся платформы для добычи нефти и газа на морском шельфе, причальные сооружения, широкая номенклатура плавучих комплексов по преобразованию энергии морских волн в полезную мощность, включая сопутствующие сооружения. При этом для удержания морских сооружений сегодня используют различные конструкции креплений, обеспечивающих устойчивость и закрепление к морскому дну.

Так, в [1] представлено техническое решение по преобразованию энергии морских волн для производства пресной воды, тепловой и электрической энергии с основным элементом системы – сильфонным насосом-компрессором. Для работы системы требуется крепление сильфонного насоса-компрессора ко дну морской акватории. В [2] авторы пришли к выводу, что среди препятствий технического характера, ограничивающих развитие и повсеместное внедрение объектов морской энергетики, является потребность в повышении степени надежности применяемых конструкций и меха-

Victor V. Mironov, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Engineering Systems and Structures, Industrial University of Tyumen (IUT), 38 Volodarskogo St, Tyumen, 625000, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 2433-2178, ORCID: 0000-0001-8939-850X; e-mail: vvmironov@list.ru

Yuriy A. Ivanyushin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Engineering Systems and Structures, Industrial University of Tyumen (IUT), 38 Volodarskogo St, Tyumen, 625000, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 9869-3687, ORCID: 0000-0002-4470-6967; e-mail: ivanjushinja@tyuiu.ru

Dmitriy V. Mironov, Candidate of Technical Sciences, lead engineer; LLC “ELECTRORAM”, 33 build. 1, ap. 79, Przhhevalskogo St, Tyumen, 625023, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 4565-8012, ORCID: 0009-0004-0765-5816; e-mail: dvmironov@yandex.ru

низмов съема мощности. Как следствие, имеются высокие капитальные и эксплуатационные затраты в сложных условиях акватории. Среди рассмотренных [2; 3] технических решений, требующих крепления к морскому дну, выделяются в первую очередь технические решения на принципе колеблющегося водяного столба (OWC — oscillating water columns) и устройства по принципу «перелива» (overtopping devices), а также ряд решений поплавкового типа (floating system). Shengjie Rui и соавторами исследования [4] отмечена и изучена совокупность факторов, требующих учета при проектировании и устройстве оснований морских сооружений различного назначения, включая донные и морские течения, свойства донного грунта, влияние циклической нагрузки, взаимодействие с биотой и прочие факторы.

Если упоминать технические решения по съему энергии морских волн, как правило, они включают в себя буй, генератор полезной мощности и донный груз. Так, в обзоре способов производства пресной воды с использованием энергии волн [5] рассмотрен ряд технических решений по преобразованиям волновой энергии. Строительство морского объекта, работающего по принципу OWC, в прибрежной деревне Vizhinjam (Индия) потребовало устройства донного груза весом 3 000 тонн. В состав установок, действующих по принципу WABRO (тела, активируемые волной — обратный осмос), также входят плавучий буй, генератор и крепление к донной поверхности. Примерами таких технических решений являются системы Delbuoy в Пуэрто-Рико (1982), Oyster в Шотландии (2009), CETO Freshwater в Австралии, проект преобразователя, разработанный в Университете Уппсала и другие решения. Аналогичные по составу основных элементов технические решения представлены в обзоре современных достижений в области преобразования энергии волн, основанных на различных системах передачи мощности [6]. Большинство рассмотренных в статье решений также включают в своем составе донный груз или другой способ крепления к донному грузу. В Тюменском индустриальном университете разработаны технические решения [7; 8] по использованию технологии обратного осмоса на основе энергии морских волн. Разработанные решения предполагают фиксацию донным грузом. В качестве фиксации может использоваться не только тяжелый груз, но и кессон (вакуумный анкер).

Применению конструкций креплений, обеспечивающих устойчивость за счет собственного веса (мертвых якорей [9]; динамически устанавливаемых анкеров, в том числе торпедных якорей [10], и прочих классических конструкций закрепления), на этапе закрепления основания сопутствуют существенные транспортные, погрузочно-разгрузочные, земляные, трудовые и, как следствие, финансовые затраты. Затраты смежного характера возникают при закреплении линейных сооружений — магистральных трубо- и газопроводов на участках со слабой несущей способностью [11]. Для обеспечения устойчивого положения трубопровода в продольном и поперечном направлениях в [11] предложено использовать классические конструкции анкеров.

В связи с этим интересно применение вакуумных технологий при организации свайных фундаментов и оснований как источника повышения технико-экономической эффективности, производительности труда и надежности работы применяемых устройств. В [12] отмечено, что в состав сваявдавливающего оборудования, например, работающего по принципу, описанному в [13], могут входить вакуумные анкерные устройства. В авторском свидетельстве [14] описано устройство для погружения анкеров вдавливанием включает вакуум-камеру и преимущественно может использоваться в водонасыщенных грунтах. В данном случае в вакуум-камере создаются периодические циклы разрежения и избыточного давления, а за счет имеющейся перегородки нажимное усилие передается в противоположные стороны при необходимости. Авторами изобретения [15] разработано решение по временному закреплению конструкций на поверхности грунта, в котором за счет создания разрежения возникает дополнительное прижимающее усилие, способствующее погружению клиновидных стенок в грунт. По окончании работ вакуумное воздействие прекращается, позволяя облегчить демонтаж временной конструкции.

Таким образом, альтернативой применению донных грузов в строительстве выступают конструкции вакуумных анкеров [7; 8; 15–19]. Вакуумный анкер, как и донный груз, фиксирует корпус генератора энергии в неподвижном состоянии, а подвижный рабочий орган генератора полезной

мощности связан с плавучим бумом, совершающим колебательные движения, вызванные волновым воздействием. Использование вакуумных анкеров предпочтительнее, чем использование тяжелых донных грузов. Вакуумные анкеры легко устанавливаются без применения тяжелой техники и также легко демонтируются в случае необходимости. Вакуумные донные анкеры помимо фиксации поплавковых устройств, снимающих энергию морских волн, нашли применение в гидротехническом строительстве и трубопроводном транспорте, судоходстве в качестве удерживающих устройств и в нефтегазовой промышленности для фиксации плавучих буровых платформ.

В [16] дана конструкция вакуумных анкеров и приведено ее обоснование для использования в качестве основной удерживающей силы магистральных трубопроводов на обводненных и болотистых грунтах. Установлено, что их характеристики зависят от конкретных условий строительства. Ряд численных расчетов показал, что изменение угла внутреннего трения грунта оказывает незначительное влияние на удерживающую способность. Однако влияние на несущую способность и надежность вакуумных анкеров оказывает размыв донного грунта. Так, в [17] исследовано влияние потери донного грунта на несущую способность вакуумных анкеров в условиях песчаного дна Южно-Китайского моря. Установлено, что учет геометрии поверхности морского дна и характера взаимодействия между грунтом и анкерами является критически важным фактором при проектировании и оценке безопасности глубоководных морских сооружений. В [18] установлено еще одно из достоинств применения вакуумных свай. Демонтаж морских платформ может осуществляться с применением контролируемых взрывов (около 35 % от общего количества демонтируемых платформ). В случае применения на платформах вакуумных герметичных свай (вакуумных анкеров), энергия взрыва направляется внутрь анкера, а не в окружающее пространство. Кроме того, ударная волна гасится внутри герметичной полости с недостаточным давлением. В изобретении [19] предлагается устройство донных креплений в виде вертикальных труб с винтовыми ребрами (в противоположных направлениях) на внешней стороне. После размещения труб вода удаляется из них посредством насоса, создавая внутри вакуум. За счет абсолютного давления оказывается давление на верхнюю заглушенную часть труб, заставляя их постепенно углубляться в грунт. Наличие винтового профиля на трубах обеспечивает дополнительное вращательное движение, которое способствует лучшему проникновению в грунт. Трубы связываются между собой жесткой перемычкой, предотвращающей их обратный поворот при воздействии выдергивающей нагрузки.

Вакуумные технологии могут использоваться и в классических технологических строительных процессах, например для консолидации грунтов оснований технологических сооружений. В [20] отмечено, что вакуумное уплотнение требует меньших энергозатрат в сравнении с электроосмотическим уплотнением. Изобретением [21] в котловане, выполненном в несвязном грунте, предлагается сформировать герметичную емкость из непроницаемой геомембраны и заполнить ее несвязным грунтом. За счет создания в полости образованной емкости отрицательного давления происходит уплотнение грунта. В данном случае вакуумное уплотнение обеспечивает ускорение и срабатывание фильтрационной консолидации (первичная фильтрационная осадка) до начала практической эксплуатации строительных объектов.

Кроме того, вакуумные технологии нашли применение в качестве методов водопонижения при защите зданий и сооружений от грунтовых и подземных вод [22; 23]. Как правило, метод вакуумного водопонижения применяется в грунтах с коэффициентом фильтрации 0,1–2,0 м/сут при условии водопонижения до 70 м и в зависимости от строения толщи грунта [22].

Таким образом, объектом исследования является вакуумный анкер как устройство крепления морских строительных объектов, в том числе для фиксации малых объектов возобновляемой волновой энергетики. При этом особый интерес вызывает поддержание несущей способности в условиях притока придонных грунтовых вод в тело анкера.

В связи с этим целью данного исследования является обоснование работоспособности вакуумных анкеров с учетом инфильтрационных процессов. Для этого необходимо установить условия, необходимые для надежного погружения анкера в грунт и его выдергивания; установить расположе-

ние линий фильтрационного тока воды и выполнить расчет фильтрационных расходов воды внутрь вакуумного анкера. Сравнивая полученные результаты расчета, можно сделать вывод о степени влияния условий погружения на величину фильтрационного расхода воды.

2. Материалы и методы

Для вдавливания вакуумных анкеров в донный грунт, в сравнении с традиционными методами организации оснований морских сооружений, используется минимум оборудования и техники. Основным элементом является насос, откачивающий воду из тела полого вакуумного анкера, создавая в нем разрежение. За счет атмосферного давления и гидростатического давления столба жидкости вакуумный анкер погружается в донный грунт. Для демонтажа вакуумного анкера достаточно создать избыточное давление внутри него, которое поднимет анкер из донного грунта [15; 18]. Вакуумные анкеры предназначены для работы на выдергивающее усилие.

На рис. 1 представлены схемы предлагаемых вакуумных анкеров, устанавливаемых в слабых и плотных осадочных донных грунтах.

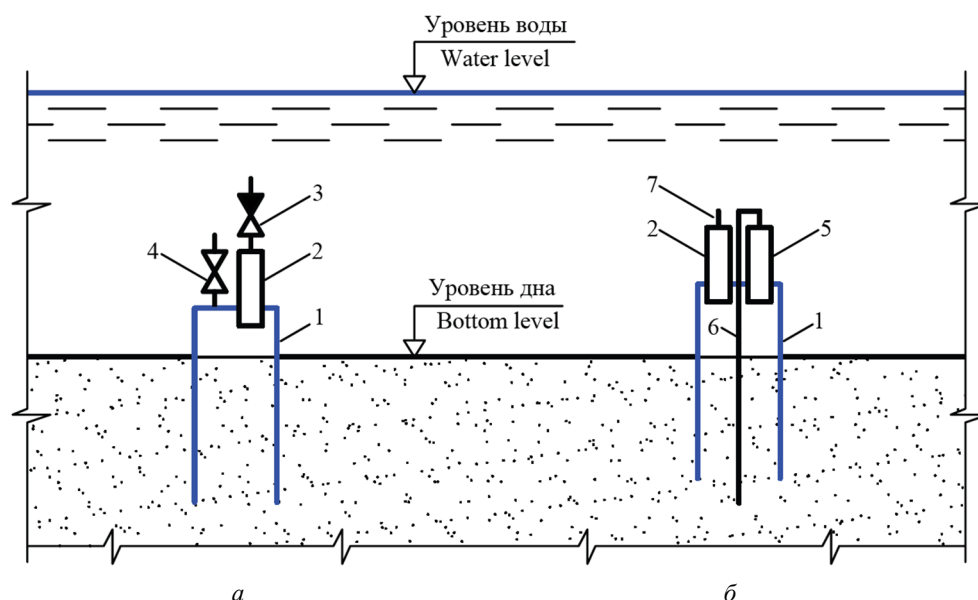


Рис. 1. Схемы вакуумных анкеров, устанавливаемых:

- a* — в слабый песчаный донный грунт; *б* — в плотный песчаный грунт с предварительным размывом;
 1 — тело вакуумного анкера; 2 — насос для откачки воды из полости вакуумного анкера; 3 — обратный клапан;
 4 — запорная арматура, используемая для создания избыточного давления в теле анкера при его демонтаже;
 5 — насос для размыва плотного донного грунта; 6 — трубопровод для размыва плотного донного грунта;
 7 — патрубок для откачки воды и пульпы из полости вакуумного анкера

Источники: выполнено В.В. Мироновым, Ю.А. Иванюшиным, Д.В. Мироновым

Figure 1. Designs of vacuum anchors installed:

- a* — in soft bottom soil; *b* — in dense sandy soil with preliminary erosion;
 1 — vacuum anchor body; 2 — pump for pumping water out of the vacuum anchor cavity; 3 — check valve;
 4 — shut-off valve used to create excess pressure in the anchor body during its dismantling;
 5 — pump for eroding dense bottom soil; 6 — pipeline for eroding dense bottom soil;
 7 — branch pipe for pumping water and pulp out of the vacuum anchor cavity

Source: made by V.V. Mironov, Yu.A. Ivanyushin, D.V. Mironov

Предложен расчет фильтрации воды внутрь вакуумного анкера при прикладывании к нему выдергивающей нагрузки. Выдергивающая нагрузка снижает абсолютное давление внутри анкера, которое в пределе не должно быть меньше давления насыщенных паров воды при заданной температуре. Снижение абсолютного давления ниже давления насыщенных паров приведет к вскипанию воды, срыву потока и кавитации внутри вакуумного анкера. При циклическом воздействии выдергива-

ющей нагрузки на вакуумный анкер фильтрация воды внутрь вакуумного анкера приведет к постепенному выходу его из донного грунта и снижению его удерживающей способности. Если толщина слоя слабого грунта достаточно большая или силы трения грунта о тело анкера при его вдавливании в грунт не позволяют достичь при погружении анкера водоупорного слоя, то при прикладывании выдергивающего усилия с образованием разрежения внутри тела анкера будет происходить фильтрация воды в полость анкера, что снижает его удерживающую способность. В этом случае профильтрованную воду необходимо удалять из полости анкера. Для этого предлагается использовать циклически работающий насос с приводом от энергии морских волн, установленный на плаву.

Проведение экспериментальных исследований путем осуществления замеров непосредственно гидравлических характеристик фильтрационных потоков внутрь вакуумного анкера трудоемко и затратно в реализации, особенно в условиях реальной акватории. Поэтому в работе был использован метод электрогидродинамической аналогии (ЭГДА) [24; 25], первоначально примененный для расчетов плотин академиком, проф. Н.Н. Павловским и впоследствии усовершенствованный многими учеными для решения фильтрационных задач [24; 26; 27].

При этом сфера применения метода достаточно обширна. Так, В.И. Щуров применил метод ЭГДА для изучения влияния степени и характера вскрытия пласта на дебит скважины, построив графики, широко используемые в практике и теории разведки и разработки месторождений. Исследования по применению метода ЭГДА для разработки нефтяных и газовых месторождений проводили П.М. Белаш, А.П. Крылов, М.М. Максимов, У. Карплюс и другие известные ученые и специалисты. Н.П. Петров выполнил расчеты линий тока в грунте под непроницаемым флютбетом плотины, а П.И. Фильчаков и В.И. Панчишин построили линии равного напора для областей фильтрации произвольной формы. А.Б. Котюков под руководством В.Е. Саитова использовал электрогидродинамическую аналогию для совершенствования процессов фильтрации и конструкций фильтров очистки воды в животноводческих комплексах. И.И. Дуоба изучал условия питания горизонтального дренажа и формирования дренажного стока с применением метода ЭГДА.

На рис. 2 представлена схема фильтрационного расчета морской воды в тело вакуумного анкера, погруженного в осадочный донный грунт с известным коэффициентом фильтрации.

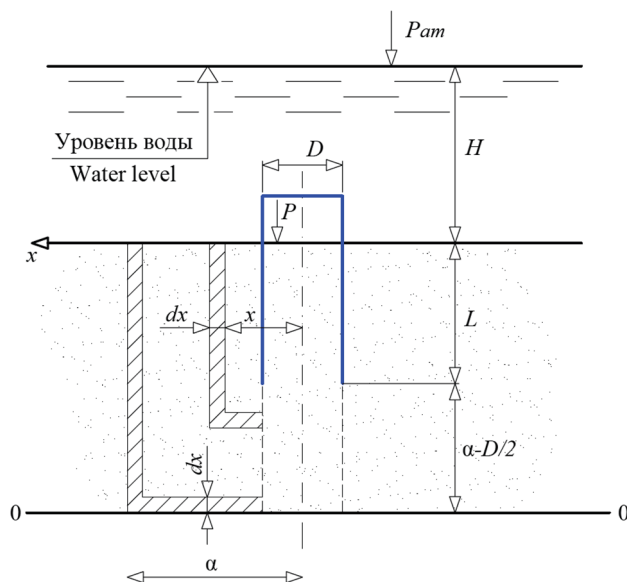


Рис. 2. Расчетная схема фильтрации морской воды в тело вакуумного анкера

Источники: выполнено В.В. Мироновым, Ю.А. Иванюшиным, Д.В. Мироновым

Figure 2. Model of sea water seepage into the body of a vacuum anchor

Source: made by V.V. Mironov, Yu.A. Ivanyushin, D.V. Mironov

Схема фильтрационного расчета была получена на плоской электрогидродинамической модели, выполненной на электропроводной бумаге с графитовым покрытием. На модель подавалось напряжение. Универсальным мультиметром (тестером напряжения) в различных точках модели определялся электрический потенциал. Таким образом, при помощи метода ЭГДА было сформировано фильтрационное поле и расположение линий фильтрационного тока морской воды внутрь вакуумного анкера при наличии в нем разрежения (рис. 2).

3. Результаты и обсуждение

Зная расположение линий фильтрационного тока, можно определить суммарный фильтрационный расход морской воды внутрь вакуумного анкера по формуле

$$Q_f = \int_{\frac{D}{2}}^{\alpha - \frac{D}{2}} \frac{2\pi \cdot k \Delta h \cdot x}{L + 2\left(x - \frac{D}{2}\right)} dx, \quad (1)$$

где Q_f — суммарный фильтрационный расход морской воды, м³/с; L — глубина погружения анкера в фильтрующий слой донного осадочного грунта, м; D — диаметр вакуумного анкера, м; Δh — потери напора при фильтрации воды от поверхности донного грунта до грунта, соприкасающегося с образующей цилиндрического вакуумного анкера, м; $\left(x - \frac{D}{2}\right)$ — расстояние от основания вакуумного анкера до водоупорного слоя грунта, м; k — коэффициент фильтрации грунта, м/с.

С учетом построенной методом ЭГДА модели весь процесс фильтрации морской воды внутрь вакуумного анкера можно разделить на три зоны. Первая зона — фильтрация воды от поверхности донного проницаемого грунта до образующей цилиндрического анкера. Вторая — фильтрация в цилиндрическом столбе проницаемого грунта под вакуумным анкером. Третья — фильтрация воды в грунте внутри анкера через слой грунта высотой L . Фильтрационные расходы воды в разных кольцевых элементарных струйках с геометрическим размером dx в первой зоне фильтрации разные из-за изменяющихся площадей живого сечения по координате x . В свою очередь, потери напора Δh одинаковые ввиду параллельности друг другу элементарных фильтрационных струек.

Фильтрационный расход воды до образующей цилиндрической поверхности анкера далее попадает в грунт цилиндрической формы под анкером. Расход поступающей профильтрованной воды Q_f в этой зоне неравномерен по высоте $\left(\alpha - \frac{D}{2}\right)$. Учитывая осреднения расхода по высоте $\left(\alpha - \frac{D}{2}\right)$ и путевую подпитку фильтрационным расходом столба грунта высотой $\left(\alpha - \frac{D}{2}\right)$, потери напора h_p в цилиндрическом слое проницаемого грунта под вакуумным анкером можно определить по формуле

$$h_p = \int_0^{\alpha - \frac{D}{2}} \frac{\frac{Q_f}{\alpha - \frac{D}{2}} \left(\frac{\left(\alpha - \frac{D}{2}\right) - x}{\alpha - \frac{D}{2}} \right)}{k \frac{\pi D^2}{4}} dx. \quad (2)$$

Фильтрационный расход воды во всех трех зонах фильтрации одинаков. Фильтрационный расход в третьей зоне Q_3 , равный Q_f , можно рассчитать по формуле с использованием закона фильтрации Дарси:

$$Q_3 = k \cdot \omega \cdot J = k \cdot \frac{\left(\frac{p_a}{\rho g} + H + L + \left(\alpha - \frac{D}{2} \right) - \Delta h - h_p \right) - \left(\frac{p}{\rho g} + L + \left(\alpha - \frac{D}{2} \right) \right)}{L} \cdot \frac{\pi D^2}{4}, \quad (3)$$

где ω — площадь поперечного сечения вакуумного анкера, м^2 , диаметром D , м; J — пьезометрический уклон, м/м, p_a — атмосферное давление, Па; p — абсолютное давление на поверхности грунта внутри вакуумного анкера, большее абсолютного давления насыщенных паров при заданной температуре, Па; H — глубина акватории моря в месте установки вакуумного анкера, м; ρ — плотность морской воды, кг/м^3 ; g — ускорение свободного падения, м/с^2 или в сокращенном виде:

$$Q_3 = k \cdot \frac{\frac{p_a - p}{\rho g} + H - \Delta h - h_p}{L} \cdot \frac{\pi D^2}{4}. \quad (4)$$

Решая систему уравнений (1), (2) и (4), определялся фильтрационный расход в зависимости от глубины акватории моря и толщины фильтрационного слоя донного грунта при известных геометрических параметрах вакуумного анкера, коэффициента фильтрации донного грунта и абсолютного давления насыщенных паров воды при заданной температуре.

Максимально допустимое выдергивающее усилие для вакуумного анкера, соответствующее абсолютному давлению насыщенных паров воды внутри анкера при заданной температуре, можно рассчитать по формуле

$$F = (p_a + \rho g H - p) \cdot \frac{\pi D^2}{4}, \quad (5)$$

где F — максимально допустимое выдергивающее усилие, H .

В качестве гипотетического примера с использованием представленных зависимостей был выполнен фильтрационный расчет вакуумного анкера с заданными размерами $D = 0,58$ м, $L = 0,9$ м при абсолютном давлении насыщенных паров воды при заданной температуре $p = 2300$ Па.

Температура морской воды $T_b = 20$ °С. Коэффициент фильтрации осадочного донного грунта $k = 0,01 \times 10^{-2}$ м/с = 0,1 мм/с. Плотность морской воды $\rho = 1020$ кг/м^3 . Глубина до донной поверхности в месте размещения анкера составляет не менее $H \geq 3$ м. Мощность слоя водопроницаемого донного грунта приведена к глубине погружения вакуумного анкера в грунт L .

Результаты расчета в виде зависимости $Q_f = f(H, L)$ представлены на рис. 3. При построении графика — для наглядного отражения: осевые линии H и Q_f инвертированы; значения по осевой линии H выставлены в обратном порядке (в соответствии с увеличением глубины акватории до дна).

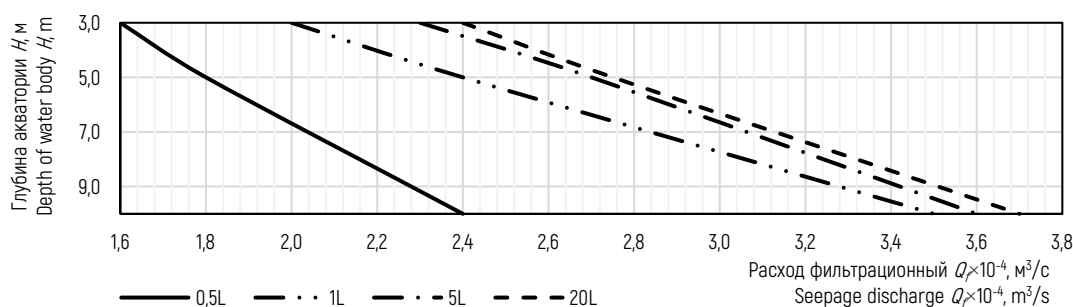


Рис. 3. Графическая зависимость фильтрационного расхода воды Q_f от глубины акватории H и толщины водопроницаемого слоя донного грунта

Источники: выполнено В.В. Мироновым, Ю.А. Иванюшиным, Д.В. Мироновым

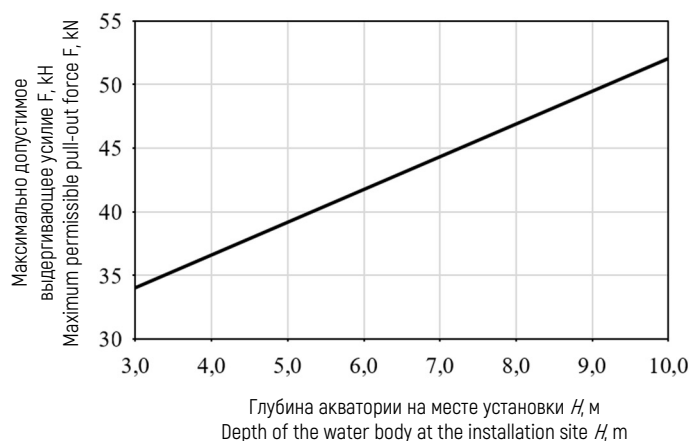
Figure 3. Graphic relationship between the water seepage discharge Q_f , the depth of the water body H and the thickness of the permeable layer of the bottom soil

Source: made by V.V. Mironov, Yu.A. Ivanyushin, D.V. Mironov

Вакуумный анкер с вышеприведенными размерами допустимо изготавливать из металлической двухсотлитровой бочки, попутно утилизируя тем самым пустую бочкотару (без значительных коррозионных повреждений и дефектов конструкции), избыточно скопившуюся в труднодоступных регионах Российской Федерации, как отмечено в [28]. Конструкция вакуумного анкера из бывшей в употреблении металлической бочки с откачивающим воду дренажным насосом, необходимым для погружения анкера в грунт, представлена на рис. 4, а.



а



б

Рис. 4. Вакуумный анкер из бывшей в употреблении металлической бочки:

а — общий вид опытного образца; б — графическая зависимость максимально допустимого выдергивающего усилия F , кН на анкер в зависимости от глубины акватории в месте его установки H , м

И с т о ч н и к: фото и схемы В.В. Миронова, Ю.А. Иванюшина, Д.В. Миронова

Figure 4. Vacuum anchor from a used metal barrel:

а — general view of the prototype; б — graphic relationship between the maximum permissible pull-out force F , kN, on the anchor and the depth of the water body at the place of its installation H , m

S o u r c e: photo and scheme by V.V. Mironov, Yu.A. Ivanyushin, D.V. Mironov

По формуле (5) для вакуумного анкера из металлической бочки при температуре морской воды $T_{\text{в}} = 20^{\circ}\text{C}$ были построены графики максимально допустимого выдергивающего усилия F в зависимости от глубины акватории H , в которой устанавливается вакуумный анкер (рис. 4, б). Анализ зависимостей (рис. 4, б) показывает, что вакуумный анкер из металлической двухсотлитровой бочки, бывшей в употреблении, может компенсировать выдергивающие нагрузки в несколько тонн.

4. Заключение

На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы.

1. Относительно недорогие вакуумные анкеры, в том числе выполненные из вторичных материалов, при установке их в слабых донных грунтах обладают значительной удерживающей способностью.

2. Вакуумные анкеры могут применяться для фиксации различных плавающих средств в акваториях с осадочными донными грунтами. Если вакуумный анкер при погружении полностью проходит слабый осадочный грунт и достигает водоупорного слоя, то его следует эксплуатировать без откачки воды из тела анкера. Единственное условие при прикладывании к анкеру выдергивающего усилия — абсолютное давление внутри тела анкера не должно быть меньше давления насыщенных паров воды при заданной температуре для предотвращения срыва анкера (парообразование внутри тела анкера с последующей кавитацией).

3. В случае, когда вакуумный анкер при вдавливании в грунт не доходит до водоупорного слоя по причине высокого коэффициента трения грунта о тело анкера или большой мощности слабого осадочного донного грунта, при прикладывании к нему выдергивающей нагрузки происходит фильтрация воды в тело анкера с вакуумом внутри него. В этом случае эксплуатация вакуумного анкера невозможна без откачки воды, профильтровавшейся в тело анкера. Откачка воды необходима для предотвращения выхода вакуумного анкера из слабого донного грунта.

4. При мощности слоя водопроницаемого донного грунта более пяти глубин погружения вакуумного анкера в донный грунт глубина морской акватории в месте установки практически не влияет на величину фильтрационного расхода (см. рис. 3). Для откачки можно использовать один из насосов с приводом от энергии морских волн, установленных на плавучем бье. Этот насос должен выполнять работу по циклической откачке профильтрованной воды из тела анкера.

5. Вакуумные анкеры являются локальным решением задачи фиксации морских сооружений, в том числе плавучих съемников энергии морских волн высокой повторяемости и обеспеченности в незамерзающих морях. Кроме того, в этом направлении существует возможность для вторичного применения бочкотары.

Список литературы

1. Миронов В.В., Иванюшин Ю.А., Суглобов Д.А., Миронов Д.В., Максимов Л.И. Технология жизнеобеспечения пляжных глэмпингов с использованием возобновляемой энергии морских волн // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. № 4 (185). С. 618–630. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2024.4.618-630> EDN: LDQQYP
2. Guo B., John V. Ringwood J.V. A review of wave energy technology from a research and commercial perspective // IET Renewable Power Generation. 2021. Vol. 15. No. 14. P. 3065–3090. <https://doi.org/10.1049/rpg2.12302> EDN: GYOPXV
3. Zhang Y., Zhao Y., Sun W., Li J. Ocean wave energy converters: Technical principle, device realization, and performance evaluation // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021. Vol. 141. Article no. 110764. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110764> EDN: CBPLID
4. Rui S., Guo Z., Zhou Z., Wang Z., Ye G., Ma, D. Frontiers in marine sciences, social sciences and engineering research related to marine (renewable) energy development // Frontiers in Marine Science. 2024. Vol. 11. Article no. 1421628. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1421628>
5. Leijon J., Boström C. Freshwater production from the motion of ocean waves — A review // Desalination. 2018. Vol. 435. P. 161–171. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.10.049>
6. Ahamed R., McKee K., Howard I. Advancements of wave energy converters based on power take off (PTO) systems: A review // Ocean Engineering. 2020. Vol. 204. Article no. 107248. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107248> EDN: PNQHZU
7. Миронов В.В., Иванюшин Ю.А., Миронов Д.В., Суглобов Д.А. Способ очистки воды от соли и загрязнений / Патент на изобретение RU 2813520 C1, 12.02.2024. Заявка № 2023113267 от 22.05.2023. EDN: SSOWFW
8. Миронов В.В., Иванюшин Ю.А., Миронов Д.В., Суглобов Д.А. Способ очистки воды от соли и загрязнений / Патент на изобретение RU 2819674 C1, 22.05.2024. Заявка № 2023131939 от 30.11.2023. EDN: XSIFRS
9. Скрыгин Л.Н. Книга о якорях. Москва : Транспорт, 1972. 128 с. URL: <https://djvu.online/file/2n5EkR44szjlz> (дата обращения: 14.02.2025).
10. Raaj S.K., Saha N., Sundaravadivelu R. Exploration of deep-water torpedo anchors — A review // Ocean Engineering. 2023. Vol. 270. P. 113607. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113607> EDN: MYKZKF
11. Некучаев В.О., Семиткина Е.В., Терентьева М.В., Кривов В.Е. Совершенствование конструктивных решений по закреплению магистрального газопровода в условиях слабонесущих грунтов // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2023. № 5–6. С. 5–12. <https://doi.org/10.24412/0131-4270-2023-5-6-5-12> EDN: BILHWZ
12. Судницына Е.С., Вахрушев С.И. Исследование способов повышения эффективности погружения свай методом вдавливания // Современные технологии в строительстве. 2017. Т. 1. С. 365–380. EDN: XNYGDR
13. Ганеев Н.В., Нестеров А.С. Устройство для погружения свай вдавливанием / Патент на полезную модель № 23629 (РФ; Патент на полезную модель). Бюл. Изобретения. Полезные модели № 18, 2002. URL: https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0000023629_20020627_U1_RU/ (дата обращения: 03.02.2025).
14. Циферов В.М., Толстов А.В., Павлов А.Б., Никитин В.И., Харько А.М. Устройство для погружения анкеров вдавливанием / Авторское свидетельство № 1409728 (СССР; Авторское свидетельство). Бюл. № 26, 1988. https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0001409728_19880715_A1_SU/?ysclid=mbp6ocaq82239864169 (дата обращения: 03.02.2025).

15. Кузьмичев Н.И., Гринберг А.Л., Гольдберг А.А. Вакуумный анкер для закрепления конструкций на поверхности грунта / Авторское свидетельство № 1649040 (СССР; Авторское свидетельство). Бюл. № 18, 1991. URL: https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0001649040_19910515_A1_SU/ (дата обращения: 14.02.2025).
16. Гулин Д.А., Салихов Б.И., Султанмагомедов Т.С., Султанмагомедов С.М. Расчет удерживающей способности вакуумного анкерного устройства // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2017. № 3. С. 33–37. EDN: YWJKJS
17. Rui S., Guo Z., Wang L., Wang H., Zhou W. Inclined loading capacity of caisson anchor in South China Sea carbonate sand considering the seabed soil loss // *Ocean Engineering*. 2022. Vol. 260. Article no. 111790. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111790> EDN: XETEJU
18. Zawawi N.A.W.A., Danyaro K.U., Liew M.S., Shawn L.E. Environmental sustainability and efficiency of offshore platform decommissioning: A review // *Sustainability*. 2023. Vol. 15. Article no. 12757. <https://doi.org/10.3390/su151712757> EDN: QQBRCC
19. Миронов В.В., Иванюшин Ю.А., Миронов Д.В., Кадысева А.А. Способ сооружения вакуумных свай / Патент на изобретение RU 2831685 C1, 11.12.2024. Заявка № 2024116586 от 13.06.2024. EDN: RFLSTX
20. Yang S., Jianting F., Chenchen Q., Jiawei W. Two-dimensional consolidation theory of vacuum preloading combined with electroosmosis considering the distribution of soil voltage // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2020. Vol. 57. No. 1. P. 25–34. <https://doi.org/10.1007/s11204-020-09633-8> EDN: MSNDQB
21. Гарбузов В.В., Харьков Н.С., Пащенко Ф.А. Способ вакуумного уплотнения основания строительной конструкции / Патент на изобретение RU 2714406 C1, 14.02.2020. Заявка № 2019131739 от 08.10.2019. EDN: RXAQJX
22. Забелина О.Б., Энгин Д. Исследование методов водопонижения при строительстве высотных зданий в условиях прибрежных районов Санкт-Петербурга // *Перспективы науки*. 2021. № 3 (138). С. 199–202. EDN: JDAAYP
23. Игидов Т.Ш. Водопонижение грунтовых вод как необходимая задача начального этапа строительства // *Евразийский научный журнал*. 2016. № 11. С. 288–291. EDN: XDSQSV
24. Талалаева В.Ф., Склярченко Е.О. Исследование фильтрации из оросительного канала методом электрогидродинамических аналогий // *Мелиорация и гидротехника*. 2023. Т. 13. № 3. С. 256–273. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-3-256-273> EDN: KAVRTA
25. Котлов О.Н., Фролова Л.А., Савельева Ю.Ю., Козуб Ю.Г., Гусакова И.Н. Развитие методов моделирования фильтрации при проектировании и эксплуатации гидротехнических сооружений // *Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева*. 2021. Т. 200. С. 43–57. EDN: DMXADF
26. Umar N. Sources of irrigation in the state of Uttar Pradesh: A regional analysis // *International Journal of Applied Research*. 2020. Vol. 6. No. 10. P. 984–993. <https://doi.org/10.22271/allresearch.2020.v6.i10o.7681> EDN: XJBUXG
27. Jha R., Smakhtin V. A review of methods of hydrological estimation at ungauged sites in India. Colombo, Sri Lanka : International Water Management Institute, 2008. 28 p.
28. Седнев В.А., Дроздов Д.А., Сергеенкова Н.А. Методы обеспечения экологической безопасности при утилизации отходов в труднодоступных районах арктической зоны // *Арктика: экология и экономика*. 2022. Т. 12. № 3. С. 444–453. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2022-3-444-453> EDN: EALBIO

References

1. Mironov V.V., Ivanyushin Yu.A., Suglobov D.A., Mironov D.V., Maksimov L.I. Life support technology of beach glamping using renewable energy of sea waves. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2024;19;4(185):618–630. (In Russ.). <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2024.4.618-630> EDN: LDQQYP
2. Guo B., John V. Ringwood J.V. A review of wave energy technology from a research and commercial perspective. *IET Renewable Power Generation*. 2021;15(14):3065–3090. <https://doi.org/10.1049/rpg2.12302> EDN: GYOPXV
3. Zhang Y., Zhao Y., Sun W., Li J. Ocean wave energy converters: Technical principle, device realization, and performance evaluation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021;141:110764. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110764> EDN: CBPLID
4. Rui S., Guo Z., Zhou Z., Wang Z., Ye G., Ma, D. Frontiers in marine sciences, social sciences and engineering research related to marine (renewable) energy development. *Frontiers in Marine Science*. 2024;11:1421628. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1421628>
5. Leijon J., Boström C. Freshwater production from the motion of ocean waves — A review. *Desalination*. 2018; 435:161–171. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.10.049>
6. Ahamed R., McKee K., Howard I. Advancements of wave energy converters based on power take off (PTO) systems: A review. *Ocean Engineering*. 2020;204:107248. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107248> EDN: PNQHZU
7. Mironov V.V., Ivanyushin Yu.A., Mironov D.V., Suglobov D.A. *Method for purifying water from salt and contaminants*. Patent RU № 2813520. Byul. No. 5. (In Russ.) EDN: XSIFRS
8. Mironov V.V., Ivanyushin Yu.A., Mironov D.V., Suglobov D.A. *Method for purifying water from salt and impurities*. Patent RU № 2819674. Byul. No. 15. (In Russ.) EDN: XSIFRS

9. Skryagin L.N. *A book about anchors*. Moscow: Transport Publ.; 1972. (In Russ.) Available from: <https://djvu.online/file/2n5EkR44szjlz> (accessed: 14.02.2025).
10. Raaj S.K., Saha N., Sundaravadivelu R. Exploration of deep-water torpedo anchors — A review. *Ocean Engineering*. 2023;270:113607. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113607> EDN: MYKZKF
11. Nekuchaev V.O., Semitkina E.V., Terent'yeva M.V., Krivov V.E. Improving design solutions for fixing the main gas pipeline in conditions of weakly bearing soils. *Transport and Storage of Oil Products and Hydrocarbons*. 2023;5-6:5–12. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/0131-4270-2023-5-6-5-12> EDN: BILHWZ
12. Sudnitsyna E.S., Vakhrushev S.I. Investigating ways to improve pile pressing efficiency. *Modern technologies in construction. Theory and practice*. 2017;1:365–380. (In Russ.) EDN: XNYGDR
13. Gapeev N.V., Nesterov A.S. *Device for driving piles by pressing*. Patent for utility model RU No. 23629 (Russia; Patent for utility mode). Byul. № 18, 2002. (In Russ.). Available from: https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0000023629_20020627_U1_RU/ (accessed: 03.02.2025).
14. Ciferov V.M., Tolstov A.V., Pavlov A.B., Nikitin V.I., Har'ko A.M. *Anchor driving device by pressing*. Certificate of authorship № 1409728 (USSR; Certificate of authorship). Byul. No. 26. 1988. (In Russ.) Available from: https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0001409728_19880715_A1_SU/?ysclid=m6p6ocaq82239864169 (accessed: 03.02.2025).
15. Kuzmichev N.I., Grinberg A.L., Goldberg A.A. *Vacuum anchor for fixing structures on the ground surface*. Certificate of authorship № 1649040 (USSR; Certificate of authorship). Byul. No. 18. 1991. (In Russ.). Available from: https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0001649040_19910515_A1_SU/ (accessed: 14.02.2025).
16. Gulín D.A., Salikhov B.I., Sultanmagomedov T.S., Sultanmagomedov S.M. Calculation of the carrying capacity of the vacuum anchor device. *Transportation and storage of petroleum products and hydrocarbon raw materials*. 2017;(3):33–37. (In Russ.) EDN: YWJKJS
17. Rui S., Guo Z., Wang L., Wang H., Zhou W. Inclined loading capacity of caisson anchor in South China Sea carbonate sand considering the seabed soil loss. *Ocean Engineering*. 2022;260:111790. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111790> EDN: XETEJU
18. Zawawi N.A.W.A., Danyaro K.U., Liew M.S., Shawn L.E. Environmental sustainability and efficiency of offshore platform decommissioning: A review. *Sustainability*. 2023;15:12757. <https://doi.org/10.3390/su151712757> EDN: QQBRCC
19. Mironov V.V., Ivanyushin Yu.A., Mironov D.V., Kadyseva A.A. *Method of erection of vacuum piles*. Patent RU No. 2831685. Byul. No. 35. (In Russ.) EDN: RFLSTX
20. Yang S., Jianting F., Chenchen Q., Jiawei W. Two-dimensional consolidation theory of vacuum preloading combined with electroosmosis considering the distribution of soil voltage. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2020;57(1):25–34. <https://doi.org/10.1007/s11204-020-09633-8>
21. Garbuzov V.V., Kharkov N.S., Pashchenko F.A. *Method of vacuum sealing of base of building structure*. Patent RU No. 2714406. Byul. No. 5. (In Russ.) EDN: RXAQJX
22. Zabelina O.B., Engin D. Research into methods of dewatering during the construction of high-rise buildings in the coastal areas of St. Petersburg. *Science prospects*. 2021;(3):199–202. EDN: JDAAYP
23. Igidov T.Sh. Groundwater lowering as a necessary task of the initial stage of construction. *Eurasian science journal*. 2016;(11):88–291. (In Russ.) EDN: XDSQSV
24. Talalaeva V.F., Sklyarenko E.O. Irrigation canal filtration study by electric analogy method. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2023;13(3):256–273. (In Russ.) <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-3-256-273> EDN: KAVRTA
25. Kotlov O.N., Frolova L.A., Savelieva Yu.Yu., Kozub Yu.G., Gusakova I.N. Development of groundwater filtration modelling for design and operation of hydro-technical structures. *Proceedings of the VNIIG*. 2021;200:43–57. (In Russ.) EDN: DMXADF
26. Umar N. Sources of irrigation in the state of Uttar Pradesh: A regional analysis. *International Journal of Applied Research*. 2020;6(10):984–993. <https://doi.org/10.22271/allresearch.2020.v6.i10o.7681> EDN: XJBUXG
27. Jha R., Smakhtin V. *A review of methods of hydrological estimation at ungauged sites in India*. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute; 2008. 28 p.
28. Sednev V.A., Drozdov D.A., Sergeenkova N.A. Methods for ensuring environmental safety in waste disposal in hard-to-reach areas of the arctic zone. *Arctic: Ecology and Economy*. 2022;12(3):444–453. (In Russ.) <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2022-3-444-453> EDN: EALBIO