

ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.157:692.9

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.5.709-717

Расчет вакуумного анкера на выдергивающее усилие в установках использования энергии морских волн

Виктор Владимирович Миронов¹, Евгений Александрович Ерофеев¹,
Юрий Андреевич Иванюшин¹, Анастасия Александровна Кадысева²

¹ Тюменский индустриальный университет (ТИУ); г. Тюмень, Россия;

² Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К.А. Тимирязева
(РГАУ — МСХА имени К.А. Тимирязева); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. При проектировании объектов преобразования волновой энергии с использованием плавучих буйев необходимо надежное закрепление их на донной поверхности. На сегодняшний день разработано множество технических решений по использованию энергии волны с различными видами фиксации плавучих буйев с донной поверхностью (грузы, анкеры, якоря).

Материалы и методы. Для решения задачи фиксации плавучих буйев, съемников энергии морских волн, с донным грунтом предлагается конструкция вакуумного анкера. Целью исследования является обоснование технического решения по применению вакуумных анкеров в установках использования энергии морских волн, предназначенных для жизнеобеспечения прибрежных объектов некапитального строительства. Для достижения поставленной цели применялись методы теоретических и экспериментальных исследований, поиск отечественных и зарубежных источников с анализом и сопоставлением данных.

Результаты. Представлены принципиальные схемы конструкции вакуумных анкеров, устраиваемых в слабых грунтах. Предлагается техническое решение и расчет удерживающей способности вакуумного анкера. По итогам экспериментальных исследований определен коэффициент трения покоя поверхности вакуумного анкера из полимерного материала в илистом обводненном грунте, позволяющий выполнять расчеты погружения и выдергивания вакуумных анкеров в слабых грунтах. Описана технология погружения вакуумных анкеров в слабый донный грунт, выполнен расчет условия погружения анкера в донный грунт и условия его выдергивания из донного грунта.

Выводы. Предлагаемые вакуумные анкеры для применения в слабых донных грунтах обладают значительной удерживающей способностью при относительно небольших размерах и стоимости с учетом строительно-монтажных работ. Внедрение их в практику снизит затраты на сооружение оснований плавучих съемников энергии морских волн и трансформацию энергии в полезную мощность в различных технологических схемах жизнеобеспечения объектов прибрежных территорий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: вакуумный анкер, донный грунт, съемники энергии морских волн, тепло- и водоснабжение объектов прибрежных морских территорий

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Миронов В.В., Ерофеев Е.А., Иванюшин Ю.А., Кадысева А.А. Расчет вакуумного анкера на выдергивающее усилие в установках использования энергии морских волн // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 5. С. 709–717. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.5.709-717

Автор, ответственный за переписку: Юрий Андреевич Иванюшин, ivanjushinja@tyuiu.ru.

Analysis of a pullout force acting on vacuum anchors in sea wave energy converters

Viktor V. Mironov¹, Evgeniy A. Erofeev¹, Yuriy A. Ivanyushin¹, Anastasiya A. Kadyseva²

¹ Industrial University of Tyumen (IUT); Tyumen, Russian Federation;

² Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. When sea wave energy converters are designed, floating buoys, being part of their structure, must be reliably anchored to the bottom. To date, numerous engineering solutions are developed towards this end. They feature various methods of fixing floating buoys to the bottom (weights, anchors, and sinkers).

Materials and methods. The vacuum anchor is designed to fix floating buoys, or sea wave energy extractors, to the soil of the sea bottom. The goal of the study is to substantiate the engineering solution to use vacuum anchors for sea wave energy converters, designated for temporary coastal construction facilities. Methods of theoretical and experimental research, identification of domestic and foreign sources, analysis and comparison of data were employed to achieve this goal.

Results. The article presents conceptual schemes of vacuum anchors to be embedded in weak soils. The authors offer an engineering solution and analyze the holding capacity of a vacuum anchor. As a result of experimental studies, the value of the static friction coefficient is found on the surface of a polymer vacuum anchor in silty waterlogged soil. This coefficient allows analyzing the immersion of vacuum anchors in weak soils and the pullout of vacuum anchors from weak soils. The authors describe the technology of vacuum anchor immersion in weak bottom soil; analyze conditions for the anchor immersion in the weak soil of the bottom, and conditions for the anchor pullout.

Conclusions. Vacuum anchors, designed for weak bottom soils, have a great holding capacity, relatively small dimensions and cost, including the cost of construction and embedment. Their practical application will reduce the cost of (1) foundations made for floating sea wave energy extractors and (2) energy transformation into useful power in various process flows designed to generate energy for coastal construction facilities.

KEYWORDS: vacuum anchor, bottom soil, sea wave energy extractors, heat and water supply to coastal construction facilities

FOR CITATION: Mironov V.V., Erofeev E.A., Ivanyushin Yu.A., Kadyseva A.A. Analysis of a pullout force acting on vacuum anchors in sea wave energy converters. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(5):709-717. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.5.709-717 (rus.).

Corresponding author: Yuriy A. Ivanyushin, ivanjushinja@tyuiu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Будучи фактором существования жизни на Земле, в Мировом океане содержится огромное количество энергии, среди которой по видам можно выделить: энергию морских течений, осмотическую энергию, тепловую энергию океана, энергию приливов и отливов, а также энергию морских волн. Каждый вид энергии достаточно широко исследован. Среди преимуществ энергии волн следует выделить ее значительные запасы, высокую плотность и широту распространения [1, 2]. Тем не менее в каждом отдельном случае необходимо учитывать условия размещения объектов преобразования волновой энергии, в том числе с целью повышения эффективности ее преобразования.

Имеется множество технических решений по использованию возобновляемой энергии морских волн для выработки электроэнергии. Есть технические решения по преобразованию энергии морских волн в пневматическую мощность, применяемую для автономного теплоснабжения и кондиционирования воздуха зданий и сооружений. Энергия морских волн может быть также преобразована в гидравлическую мощность высокого давления для опреснения морской воды в обратноосмотических установках автономного водоснабжения населения прибрежных территорий [3, 4]. Как правило, большинство таких технических решений по съему энергии морских волн [4, 5] включают в себя плавучий буй, генератор полезной мощности и донный груз.

При этом для удержания различных морских платформ, в том числе шельфовых платформ добычи нефти и газа, различного назначения барж, широкое распространение получили и сегодня используются так называемые мертвые якоря¹. Если говорить о конструкциях креплений, обеспечивающих устойчивость за счет собственного веса, среди которых и мертвые якоря, то их применению на этапе закрепления основания сопутствуют значительные транс-

портные, погрузочно-разгрузочные, земляные, трудовые и, как следствие, финансовые затраты [6].

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 используемых устройств. Так, сваевдавливающие устройства могут оборудовать вакуумными камерами, предназначенными для восприятия реактивных усилий грунта при погружении свай [7–9].

Как альтернатива применению донных грузов в строительстве, разработаны конструкции вакуумных анкеров [10–13]. 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 по сравнению с тяжелыми донными грузами. Вакуумные анкера легко устанавливаются без применения тяжелой техники и также легко демонтируются в случае необходимости. Вакуумные донные анкера, помимо фиксации поплавковых устройств, снимающих энергию морских волн, нашли применение в гидротехническом и трубопроводном строительстве, судостроительстве в качестве удерживающих устройств и в нефтегазовой промышленности для фиксации плавучих буровых платформ. Также вакуумные насосы, как основное оборудование для создания отрицательного давления, используются при ликвидации разливов нефти в составе конструкции вакуумных скиммеров [14] как на стационарных платформах, так и в составе подвижных плавучих средств.

Также стоит отметить, что вакуумные технологии могут использоваться и в классических технологических строительных процессах, например, для консолидации грунтов оснований технологических сооружений [15, 16] в качестве методов водопонижения при защите зданий и сооружений от грунтовых и подземных вод [17, 18].

¹ Бородавкин П.П. Морские нефтегазовые сооружения : учеб. для вузов. Ч. 1. Конструирование. М. : Недра, 2006. 555 с.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Цель исследования — обоснование применимости вакуумных анкеров совместно с плавучими буйами в установках использования энергии морских волн высокой повторяемости и обеспеченности для жизнеобеспечения различных объектов прибрежных морских территорий. Для вдавливания вакуумных анкеров в донный грунт используется минимум оборудования и техники. Основное оборудование — это 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 [13]. Вакуумные анкеры предназначены для работы на выдергивающее усилие.

Технические решения по преобразованию энергии морских волн (объекты волновой энергетики) круглогодично работоспособны и экономически эффективны только в незамерзающих морских акваториях [3]. В связи с этим вопросы работоспособности вакуумных анкеров в замерзающих в период действия отрицательных температур морских акваториях не рассматривались, хотя и являются направлением дальнейших исследований.

На рис. 1, 2 представлены схемы предлагаемых вакуумных анкеров, устанавливаемых в слабых осадочных донных грунтах, и их фотографии.

Расчетные зависимости. В статье предлагается расчет вдавливания и удерживающей способности вакуумного анкера с учетом сил трения анкера об осадочный донный грунт. При откачке воды из тела анкера в процессе его установки в полости анкера будет образовываться вакуум и анкер будет погружаться в грунт до тех пор, пока силы трения грунта о поверхность анкера не превысят силу вдавливания, которая зависит от гидростатического давления, степени разрежения и диаметра цилиндрического полого анкера. Если толщина осадочного донного грунта незначительна и анкер при погружении достигает водоупорного слоя, то процесс вдавливания прекращают. Анкер можно эксплуатировать при одном условии: выдергивающее усилие, вызванное колебаниями плавучего буя, не должно приводить к образованию абсолютного давления внутри анкера, меньшему, чем давление насыщенных паров воды при заданной температуре. Это условие необходимо для предотвращения срыва анкера в результате парообразования внутри анкера с последующим схлопыванием пузырьков пара и кавитацией. 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 профильтровав-

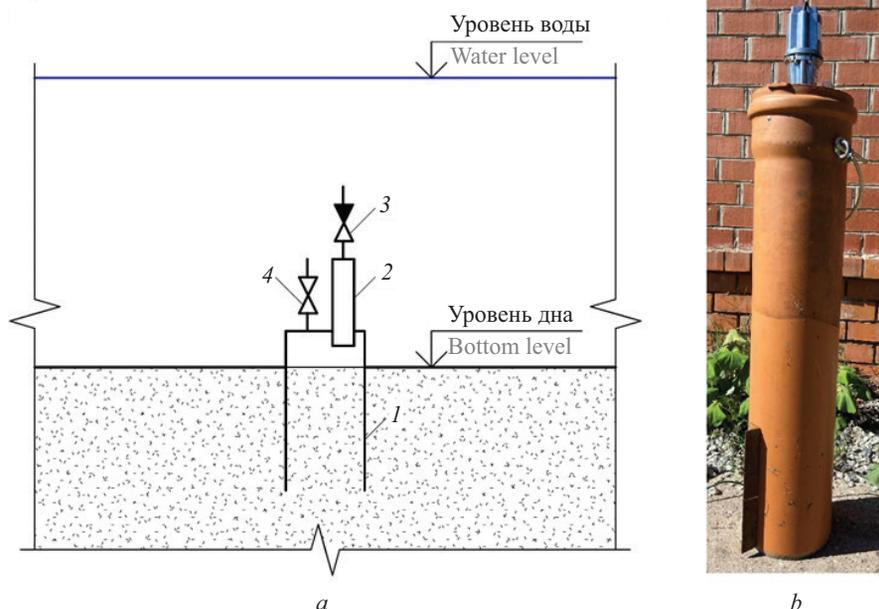


Рис. 1. Вакуумный анкер, устанавливаемый в слабый донный грунт: *a* — схема вакуумного анкера; *b* — внешний вид прототипа вакуумного анкера (фотография); *1* — тело вакуумного анкера; *2* — насос для откачки воды при его установке; *3* — обратный клапан; *4* — запорная арматура, используемая для создания избыточного давления в теле анкера при его демонтаже

Fig. 1. Vacuum anchor embedded in weak sea bottom soil: *a* is the vacuum anchor schematic; *b* is the external view of the vacuum anchor prototype (the photo); *1* is the vacuum anchor body; *2* is the pump to remove water during anchor embedment; *3* is the back valve; *4* is the shut-off valve to create excess pressure in the anchor body during dismantling

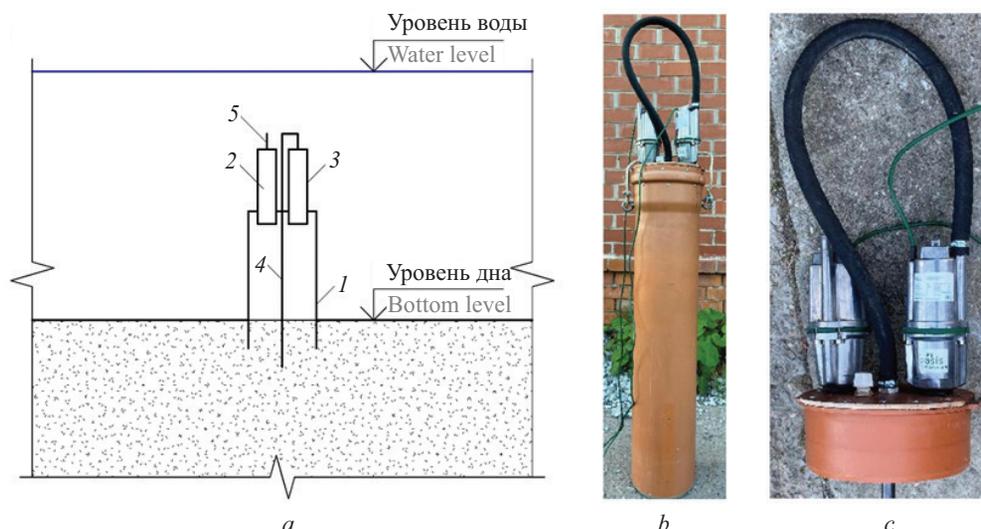


Рис. 2. Вакуумный анкер, устанавливаемый в плотном песчаном грунте с предварительным размывом: *a* — схема вакуумного анкера; *b* — внешний вид конструкции (фотография); *c* — внешний вид верхней части анкера (фотография); *1* — тело вакуумного анкера; *2* — насос для откачки воды из полости вакуумного анкера; *3* — насос для размыва плотного донного грунта; *4* — трубопровод для размыва плотного донного грунта; *5* — патрубок для откачки воды и пульпы из полости вакуумного анкера

Fig. 2. Vacuum anchor embedded in dense sandy soil subjected to erosion: *a* is the schematic of a vacuum anchor; *b* is the external view of the structure (the photo); *c* is the external view of the anchor head (the photo); *1* is the body of the vacuum anchor; *2* is the pump to remove water from the vacuum anchor cavity; *3* is the pump to erode dense bottom soil; *4* is the pipeline to erode dense bottom soil; *5* is the nozzle to pump water and pulp from a cavity in the vacuum anchor

шуюся воду требуется удалять из полости анкера. Для этого можно использовать циклически работающий насос с приводом от энергии морских волн, установленный на плавучем бье. В пределе силы трения грунта о поверхность вакуумного анкера при его погружении не должны превышать силу вдавливания вакуумного анкера в донный грунт F , которую можно установить следующим образом:

$$F = \frac{1}{4} \cdot (\rho \cdot g \cdot H + p_a - p_{\text{абс}}) \cdot \pi \cdot D^2, \quad (1)$$

где F — сила вдавливания вакуумного анкера в донный грунт, Н; ρ — плотность воды, кг/м³; g — ускорение свободного падения, м/с²; H — глубина акватории в месте размещения, м; p_a — атмосферное давление, Па; $p_{\text{абс}}$ — абсолютное давление в теле вакуумного анкера при откачке из него воды, Па; D — диаметр поперечного сечения круглого вакуумного анкера, м.

Расчетная схема для определения силы трения анкера о донный грунт приведена на рис. 3.

Силы трения донного грунта о тело вакуумного анкера можно определить по формуле:

$$T = \int_0^L 2 \cdot k \cdot (\rho \cdot g \cdot H + p_a + \rho_0 \cdot g \cdot h) \cdot \pi \cdot D \cdot dh, \quad (2)$$

где T — сила трения обводненного грунта о тело вакуумного анкера, Н; L — длина вакуумного анкера, м; k — коэффициент трения покоя поверхности анкера о донный грунт, представляющий собой отношение

силы трения к силе давления обводненного грунта на поверхность вакуумного анкера; ρ_0 — плотность обводненного грунта, кг/м³; h — текущая глубина погружения анкера в донный грунт, не превышающая длины анкера, м; dh — вертикальный размер элементарной площадки тела анкера.

Чем больше диаметр поперечного сечения круглого вакуумного анкера, тем больше его удерживающая способность. Как верно отмечено в работе [10], при увеличении диаметра в 10 раз (например, от 100 до 1000 мм) удерживающая способность увеличивается в 15,6 раза. Зависимость удерживающей способности от давления $p_{\text{абс}}$ в теле вакуумного анкера обратно пропорциональная: при создании абсолютного вакуума (идеальные условия) в теле анкера (вакуумной камере) его удерживающая способность будет на 25 % выше в сравнении с анкером аналогичной конструкции, во внутреннем объеме которого будет существовать атмосферное давление. При этом зависимость удерживающей способности анкера в зависимости от его длины L носит прямой параболический характер².

Таким образом, в случае негативного изменения характеристик морской акватории (избыточное волнение морской поверхности), с точки зрения практики проектирования аналогично свайным и ан-

² Гулин Д.А. Обеспечение устойчивости трубопроводов в слабонесущих грунтах с использованием вакуумных анкерных устройств : автореф. дис. канд. техн. наук. Уфа : УГНТУ, 2019. 24 с.

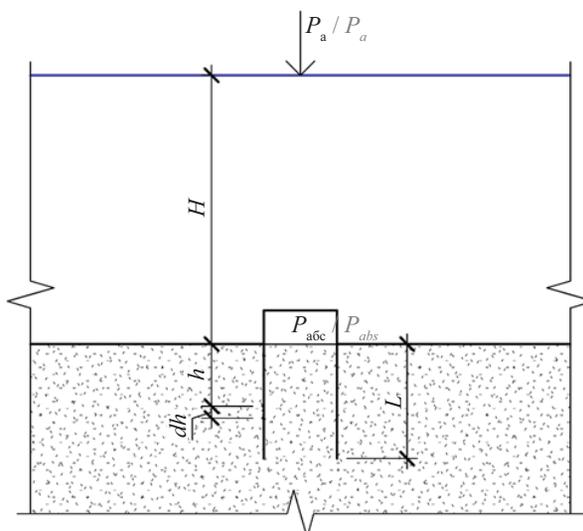


Рис. 3. Схема для расчета силы трения поверхности вакуумного анкера о донный грунт

Fig. 3. Schematic for analyzing the force of the vacuum anchor surface friction on the bottom soil

керным фундаментам морских сооружений при подборе геометрических параметров вакуумного анкера его удерживающую способность можно повысить за счет увеличения вышеобозначенных характеристик и, как следствие, возникающих сил трения. Также при обосновании, с целью повышения надежности и безопасности, размещенные вакуумные анкеры могут дублироваться (с целью распределения расчетной нагрузки).

Формула (2) получена из предположения, что на некоторой элементарной площадке с вертикальным размером dh , расположенной на глубине h , давление во всех точках этой площадки одинаково. Донный грунт соприкасается с телом вакуумного анкера с внешней и внутренней его поверхности, поэтому сила трения удваивается.

При погружении вакуумного анкера в донный обводненный грунт должно соблюдаться условие неравенства:

$$F > T. \quad (3)$$

При несоблюдении условия неравенства (3) погружение вакуумного анкера в донный грунт прекратится.

Сложность использования формулы (2) в расчетах удерживающей силы вакуумного анкера заключается в неопределенности коэффициента трения покоя анкера о донный грунт [19, 20]. Он зависит от материала, из которого изготовлен вакуумный анкер и свойств обводненного донного грунта. Коэффициент трения каждый раз должен определяться опытным путем в месте установки вакуумного анкера.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В Тюменском индустриальном университете были проведены эксперименты по определению

коэффициента трения покоя вакуумного анкера со стенкой из полиэтиленового материала в илистом обводненном грунте. Общий вид установки по установлению коэффициента трения вакуумного анкера о донный грунт показан на рис. 4.



Рис. 4. Общий вид установки по определению коэффициента трения вакуумного анкера о донный грунт: 1 — пластиковый трубный вакуумный анкер с погружным электронасосом внутри; 2 — талреп; 3 — крановые весы
Fig. 4. General view of a unit used to find the coefficient of the vacuum anchor friction on the bottom soil: 1 — plastic pipe-shaped vacuum anchor with a submersible electric pump inside; 2 is a stretching screw; 3 is a crane scale

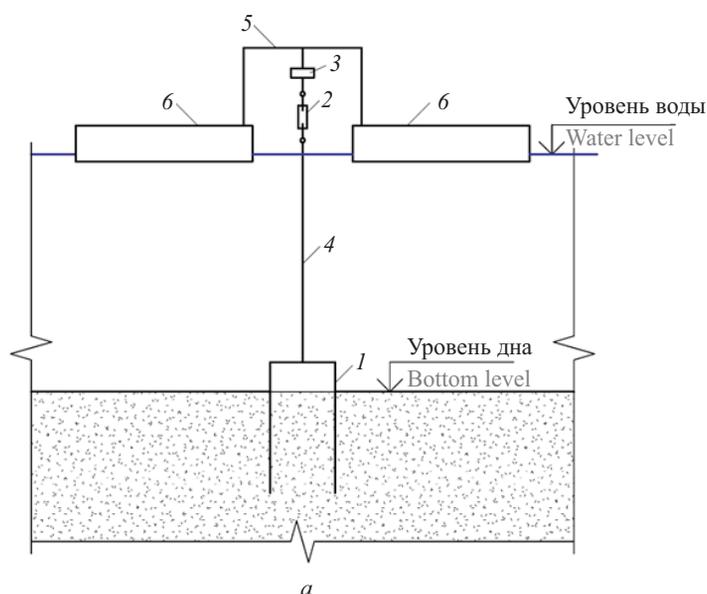


Рис. 5. Схема установки по определению коэффициента трения в акватории: 1 — вакуумная свая в донном грунте; 2 — талреп (винтовая стяжка); 3 — крановые весы; 4 — трос; 5 — жесткая рама; 6 — понтоны

Fig. 5. Schematic of a unit used to find the value of the friction coefficient in the water area: 1 is a vacuum pile in the bottom soil; 2 is a stretching screw; 3 is a crane scale; 4 is a cable; 5 is a rigid frame; 6 are pontoons

Коэффициент трения покоя определялся с использованием крановых весов, измеряющих выдерживающее усилие на установленный вакуумный анкер с известными размерами и глубиной погружения в донный грунт. Крановые весы закреплялись на жесткой неподвижной раме, размещенной на понтонах. Схема установки по определению коэффициента трения, расположенной в акватории, представлена на рис. 5.

Выдерживающее усилие имитировалось талрепом. Фиксировалось усилие на крановых весах, при котором начинались подвижки вакуумного анкера. Выдерживающее усилие можно смоделировать также закачкой через запорную арматуру 4 (рис. 1) воды, измеряя при этом давление и вычисляя силу, выталкивающую вакуумный анкер из донного грунта, зная площадь поперечного сечения анкера. Коэффициент трения определялся расчетным путем из формулы (2), приравнивая показания крановых весов к силе трения анкера о донный илистый грунт. Экспериментальные результаты показали, что для пластиковых трубных вакуумных анкеров различных диаметров: 0,11; 0,16; 0,25 м коэффициент трения покоя в среднем составляет $k = 0,01$. Данная методика установления коэффициента трения может быть применима для любых слабых осадочных грунтов при определении предельной глубины погружения цилиндрического вакуумного анкера с заданными размерами и свойствами материала, из которого он изготовлен, а также гидростатического давления воды в месте установки.

В качестве гипотетического примера рассмотрим погружение вакуумного анкера с диаметром поперечного сечения $D = 0,5$ м и длиной

$L = 3$ м в обводненный илистый грунт на глубине $H = 5$ м в морской акватории с плотностью воды $\rho = 1020$ кг/м³. Плотность обводненного илистого грунта $\rho_0 = 1040$ кг/м³. Коэффициент трения тела анкера об илистый грунт $k = 0,01$. Атмосферное давление составляет $p_a = 105$ Па, абсолютное давление внутри вакуумного анкера при работе насоса, откачивающего воду из полости анкера, $p_{\text{абс}} = 0,2 \cdot 10^5$ Па. Расчет по формулам (1) и (2) показал, что сила вдавливания вакуумного анкера в обводненный илистый грунт составляет $F = 2,55 \cdot 10^4$ Н. Сила трения анкера об обводненный донный илистый грунт равна $T = 1,56 \cdot 10^4$ Н. Условие неравенства (3) соблюдается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Из вышеизложенного в статье материала можно сделать вывод, что относительно недорогие вакуумные анкеры при установке их в слабых донных грунтах обладают значительной удерживающей способностью. Такие 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 можно эксплуатировать без откачки воды из тела анкера. Единственное условие при прикладывании к анкеру выдерживающего 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). Если вакуумный анкер при вдавливании в грунт не доходит до водоупорно-

го слоя по причине высокого коэффициента трения грунта о тело анкера или большой толщи слабого осадочного донного грунта, то при прикладывании к нему выдергивающей нагрузки возможна фильтрация воды в тело анкера с вакуумом внутри него. В этом случае эксплуатация вакуумного анкера невозможна без откачки воды, профильтрованной в тело анкера. Откачка воды необходима для предотвращения выхода вакуумного анкера из слабого донного грунта. Для этого 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.

Вакуумные анкеры являются отличным решением для фиксации плавучих съемников энергии морских волн высокой повторяемости и обеспеченности в незамерзающих морях. Полученная энергия используется для жизнеобеспечения (тепло- и водоснабжения) объектов, как правило, некапитального прибрежного строительства, в том числе строящихся и активно развивающихся пляжных морских глэмпингов в рамках реализации национального проекта «Туризм и индустрия гостеприимства».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Qiu S., Liu K., Wang D., Ye J., Liang F. A comprehensive review of ocean wave energy research and development in China // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019. Vol. 113. P. 109271. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109271
2. Lehmann M., Karimpour F., Goudey C.A., Jacobson P.T., Alam M-R. Ocean wave energy in the United States: Current status and future perspectives // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 74. Pp. 300–1313. DOI: 10.1016/j.rser.2016.11.101
3. Миронов В.В., Ивановишин 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. С. 618–630. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.618-630
4. Leijon J., Boström C. Freshwater production from the motion of ocean waves : a review // *Desalination*. 2018. Vol. 435. Pp. 161–171. DOI: 10.1016/j.desal.2017.10.049
5. 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. P. 107248. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.107248
6. 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. DOI: 10.24412/0131-4270-2023-5-6-5-12. EDN BILHWZ.
7. Судницына Е.С., Вахрушев С.И. Исследования способов повышения эффективности погружения свай методом вдавливания // *Современные технологии в строительстве. Теория и практика*. 2017. Т. 1. С. 365–380. EDN XNYGDR.
8. Авторское свидетельство № 1409728 А1 СССР, МПК E02D 7/20. Устройство для погружения анкеров вдавливанием / Циферов В.М., Толстов А.В., Павлов А.Б., Никитин В.И., Харько А.М.; заявитель Московский геологоразведочный институт им. Сер-
- го Орджоникидзе; заявл. № 3948224 от 02.09.1985; опубл. 15.07.1988. EDN ZFJKJ.
9. Патент RU № 23629 U1, МПК E02D 7/20. Устройство для погружения свай вдавливанием / Ганеев Н.В., Нестеров А.С.; заявитель Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия; заявл. № 2001132-378/20 от 28.11.2001; опубл. 27.06.2002. EDN QCONIG.
10. 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.
11. Миронов В.В., Ивановишин Ю.А., Суглобов Д.А. Вакуумный анкер для съемников энергии морских волн // *Актуальные проблемы строительной отрасли и образования – 2023* : сб. докл. IV Нац. науч. конф. 2024. С. 43–46. EDN DQZHXE.
12. Raaj S.K., Saha N., Sundaravadivelu R. Exploration of deep-water torpedo anchors : a review // *Ocean Engineering*. 2023. Vol. 270. P. 113607. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.113607
13. 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. Issue 17. P. 12757. DOI: 10.3390/su151712757
14. Кайаду У.Де.С. Экологические риски при бурении скважин // *Фундаментальные и прикладные научные исследования в современном мире* : сб. науч. ст. по мат. I Междунар. науч.-практ. конф. 2023. С. 186–193. EDN NXJPLG.
15. 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. Issue 1. Pp. 25–34. DOI: 10.1007/s11204-020-09633-8
16. Патент RU № 2714406 C1 РФ, МПК E02D 3/11. Способ вакуумного уплотнения основания строительной конструкции / Гарбузов В.В., Харьков Н.С., Пащенко Ф.А.; заявитель АО «ПИИНИИ ВТ «Лен-

аэропроект»; заявл. № 2019131739 от 08.10.2019; опубл. 14.02.2020. EDN RXAQJX.

17. 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.

18. Игидов Т.Ш. Водопонижение грунтовых вод как необходимая задача начального этапа строительства // Евразийский научный журнал. 2016. № 11. С. 292–295. EDN XDSQSV.

19. Коронатов В.А., Герасимов С.Н., Дудина И.В. Теория погружения сваи в грунт при продольно-вибрационном воздействии // Системы. Методы. Технологии. 2020. № 4 (48). С. 26–31. DOI: 10.18324/2077-5415-2020-4-26-31. EDN VTEPYH.

20. Бояринцев А.В., Самохина А.Д. Экспериментальное изучение изменения шероховатости поверхности материала подземной конструкции при ее погружении в грунт // Construction and Geotechnics. 2023. Т. 14. № 2. С. 75–91. DOI: 10.15593/2224-9826/2023.2.06. EDN KHWFIS.

Поступила в редакцию 5 ноября 2024 г.

Принята в доработанном виде 15 января 2025 г.

Одобрена для публикации 5 марта 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Виктор Владимирович Миронов** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры инженерных систем и сооружений; **Тюменский индустриальный университет (ТИУ)**; 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 38; РИНЦ ID: 384652, Scopus: 57196778368, ResearcherID: AАН-6967-2019, ORCID: 0000-0001-8939-850X; vvmironov@list.ru;

Евгений Александрович Ерофеев — старший преподаватель кафедры инженерных систем и сооружений; **Тюменский индустриальный университет (ТИУ)**; 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 38; РИНЦ ID: 815321, Scopus: 6508213719, ORCID: 0000-0002-8273-6956; erofeevea@tyuiu.ru;

Юрий Андреевич Иванюшин — кандидат технических наук, доцент кафедры инженерных систем и сооружений; **Тюменский индустриальный университет (ТИУ)**; 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 38; РИНЦ ID: 758082, Scopus: 56199460900, ResearcherID: V-9425-2019, ORCID: 0000-0002-4470-6967; ivanjushinja@tyuiu.ru;

Анастасия Александровна Кадысева — доктор биологических наук, доцент, профессор кафедры сельскохозяйственного водоснабжения, водоотведения, насосов и насосных станций; **Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К.А. Тимирязева (РГАУ — МСХА имени К.А. Тимирязева)**; 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49; РИНЦ ID: 698088, Scopus: 57214243999, ResearcherID: M-6451-2016, ORCID: 0000-0001-8703-5684; kadyseva@mail.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Qiu S., Liu K., Wang D., Ye J., Liang F. A comprehensive review of ocean wave energy research and development in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019; 113:109271. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109271
2. Lehmann M., Karimpour F., Goudey C.A., Jacobson P.T., Alam M-R. Ocean wave energy in the United States: Current status and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017; 74:1300-1313. DOI: 10.1016/j.rser.2016.11.101
3. Mironov V.V., Ivanyushin Yu.A., Suglov 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):618-630. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.618-630 (rus.).
4. Leijon J., Boström C. Freshwater production from the motion of ocean waves : a review. *Desalination*. 2018; 435:161-171. DOI: 10.1016/j.desal.2017.10.049
5. 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. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.107248
6. 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. DOI: 10.24412/0131-4270-2023-5-6-5-12. EDN BILHWZ. (rus.).
7. Sudnitsyna E.S., Vakhrushev S.I. Investigating ways to improve pile pressing efficiency. Modern Technologies in Construction. *Theory and Practice*. 2017; 1:365-380. EDN XNYGDR. (rus.).
8. Certificate of authorship No. 1409728 A1 USSR, IPC E02D 7/20. *Anchor driving device by pressing / Ciferov V.M., Tolstov A.V., Pavlov A.B., Nikitin V.I., Har'ko A.M.; applicant Moscow Geological Prospecting Institute named after Sergo Ordzhonikidze; No. 3948224 filing 02.09.1985; publ. 15.07.1988. EDN ZFJKJ. (rus.).*

9. Patent RU No. 23629 U1, IPC E02D 7/20. *Device for driving piles by pressing* / Gapeev N.V., Nestorov A.S.; Siberian State Automobile and Highway Academy. No. 2001132378/20 filing 28.11.2001; publ. 27.06.2002. EDN QCONIG. (rus.).
10. Gulin D.A., Salikhov B.I., Sultanmagomedov T.S., Sultanmagomedov S.M. Calculation of the carrying capacity of the vacuum anchor device. *Transport and Storage of Oil Products and Hydrocarbons*. 2017; 3:33-37. EDN YWJKJS. (rus.).
11. Mironov V.V., Ivanyushin Yu.A., Suglobov D.A. Vacuum Anchor for Seawater Energy Extractors. *Current issues in the construction industry and education – 2023 : digest of reports IV National scientific conference*. 2024; 43-46. EDN DQZHXE. (rus.).
12. Raaj S.K., Saha N., Sundaravadivelu R. Exploration of deep-water torpedo anchors : a review. *Ocean Engineering*. 2023; 270:113607. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.113607
13. 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(17):12757. DOI: 10.3390/su1517-12757
14. Kaiadu U.De.S. Environmental risks during well drilling. *Fundamental and applied scientific research in the modern world : Collection of scientific articles based on the materials of the I International scientific and practical conference*. 2023; 186-193. EDN NXJPLG. (rus.).
15. 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. DOI: 10.1007/s11204-020-09633-8
16. Patent RU No. 2714406 C1, IPC E02D 3/11. *Method of vacuum sealing of base of building structure* / Garbuzov V.V., Kharkov N.S., Pashchenko F.A.; proprietor Design, Survey and Research Institute of Air Transport “Lenaeroproekt”; No. 2019131739 filing 08.10.2019; publ. 14.02.2020. EDN RXAQJX. (rus.).
17. 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(138):199-202. EDN JDAAYP. (rus.).
18. Igidov T.Sh. Groundwater lowering as a necessary task of the initial stage of construction. *Eurasian Science Journal*. 2016; 11:292-295. EDN XDSQSV. (rus.).
19. Koronotov V.A., Gerasimov S.N., Dudina I.V. Theory of pile immersion in the ground under longitudinal vibration action. *Systems. Methods. Technologies*. 2020; 4(48):26-31. DOI: 10.18324/2077-5415-2020-4-26-31. EDN VTEPYH. (rus.).
20. Boyarintsev A.V., Samohina A.D. Experimental investigation of surface roughness changes of an underground structure’s material during its driving into the ground. *Construction and Geotechnics*. 2023; 14(2):75-91. DOI: 10.15593/2224-9826/2023.2.06. EDN KHWFIS. (rus.)

Received November 5, 2024.

Adopted in revised form on January 15, 2025.

Approved for publication on March 5, 2025.

B I O N O T E S : **Viktor V. Mironov** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Engineering Systems and Structures; **Industrial University of Tyumen (IUT)**; 38 Volodarskogo st., Tyumen, 625000, Russian Federation; ID RSCI: 384652, Scopus: 57196778368, ResearcherID: AAH-6967-2019, ORCID: 0000-0001-8939-850X; vvmironov@list.ru;

Evgeniy A. Erofeev — senior lecturer of the Department of Engineering Systems and Structures; **Industrial University of Tyumen (IUT)**; 38 Volodarskogo st., Tyumen, 625000, Russian Federation; ID RSCI: 815321, Scopus: 6508213719, ORCID: 0000-0002-8273-6956; erofeeva@tyuiu.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; ID RSCI: 758082, Scopus: 56199460900, ResearcherID: V-9425-2019, ORCID: 0000-0002-4470-6967; ivanjushinja@tyuiu.ru;

Anastasiya A. Kadyseva — Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Professor of the Department Agricultural Water Supply, Water Disposal, Pumps and Pumping Stations; **Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy**; 49 Timiryazevskaya st., Moscow, 127434, Russian Federation; ID RSCI: 698088, Scopus: 57214243999, ResearcherID: M-6451-2016, ORCID: 0000-0001-8703-5684; kadyseva@mail.ru.

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The authors declare no conflict of interest.