

РАСЧЕТ УДЕРЖИВАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ВАКУУМНОГО АНКЕРНОГО УСТРОЙСТВА

Д.А. ГУЛИН, аспирант кафедры сооружения и ремонта газонефтепроводов и газонефтехранилищ

Б.И. САЛИХОВ, студент

Т.С. СУЛТАНМАГОМЕДОВ, студент

С.М. СУЛТАНМАГОМЕДОВ, д.т.н., проф., декан факультета трубопроводного транспорта ФГБОУ ВО Уфимский государственный нефтяной технический университет (Россия, 450062, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1).

E-mail: denis.ufa@list.ru

Одной из важнейших задач трубопроводного строительства является удержание в проектом положении магистральных трубопроводов, так как потеря устойчивости эксплуатируемых газонефтепроводов довольно часто встречается при прокладке в условиях болот, многолетнемерзлых грунтов и на пересечениях с водными препятствиями. В свою очередь, явление присоса тела к грунту является одной из сил, за счет которых возможно решение поставленной задачи. Авторами статьи было предложено использовать вакуумное анкерное устройство для закрепления трубопроводов в проектом положении. В статье определены расчетные нагрузки и воздействия, за счет которых обеспечивается несущая способность устройства, а также произведены расчеты несущей способности, по результатам которых сделан вывод о возможности применения данного устройства в различных грунтах и дана область применения этих устройств.

Ключевые слова: магистральный трубопровод, средства балластировки, анкерные устройства, анкер, вакуумное анкерное устройство, устойчивость трубопроводов.



Важным обстоятельством при проектировании и строительстве магистральных трубопроводов в сложных условиях и при переходах через естественные и искусственные препятствия является учет явления присоса.

Присос тела к грунту – это явление, определяемое понижением давления в поровой воде (вплоть до образования вакуума) в какой-то области грунта под подошвой отрываемого тела [1].

Особенно актуальным явление присоса стало в морской практике. Наиболее частый случай – подъем затонувших кораблей. Явление присоса возникает вследствие того, что при отрыве тела от морского дна в верхнем слое грунта возникает область пониженного давления. Сила присоса связана с так называемым процессом реконсолидации, то есть с процессом неустановившейся фильтрации воды из акватории в зону возникающих отрицательных избыточных давлений в порах водонасыщенного грунта.

В практике судоподъемных работ для учета явления присоса используется коэффициент силы присоса [2]. Значения

коэффициентов силы присоса для разных грунтов в зависимости от угла внутреннего трения приведены в табл. 1.

С учетом коэффициентов определяется отрывной вес судна. Под отрывным весом судна понимается совокупность подъемного веса и силы присоса судна и грунта.

Величина отрывного веса определяется по формуле

$$P_{\text{отп}} = (1 + k_n) \cdot P_n, \quad (1)$$

где k_n – коэффициент силы присоса, определяемый по табл. 1, P_n – подъемный вес корабля, определенный с учетом сил взвешивания.

В практике для удержания морских нефтегазовых сооружений, таких как платформы, трубоукладочные баржи, издавна используются так называемые мертвые якоря, удерживающая сила которых в основном определяется силами присоса поверхности опирания якоря о грунт. Конструктивные схемы якорей приведены на рис. 1 [3].

В трубопроводном строительстве с силой присоса приходится иметь дело при укладке подводных трубопроводов способом протаскивания по грунту. Так, остановка подводного трубопровода приводит к присосу труб к грунту и резкому увеличению тяговой силы. При этом рвутся тяговые тросы, а мощности тяговых устройств может оказаться недостаточно для трогания по дну водоема. Усилие протаскивания в этом случае определяется как [4]:

$$T_{\text{пр}} = f_B G_B + q_{\text{пс}} S, \quad (2)$$

где f_B – коэффициент трения трубопровода о грунт в воде; G_B – общий вес протаскиваемого трубопровода в воде, кН; $q_{\text{пс}}$ – интенсивность присоса трубопровода ко дну подводной траншеи; в суглинках и плотных глинах $q_{\text{пс}} = 0,3 \text{ кН/м}^2$, в вязких глинах $q_{\text{пс}} = 0,6 \text{ кН/м}^2$; S – площадь поверхности контакта трубопровода с грунтом, м^2 .

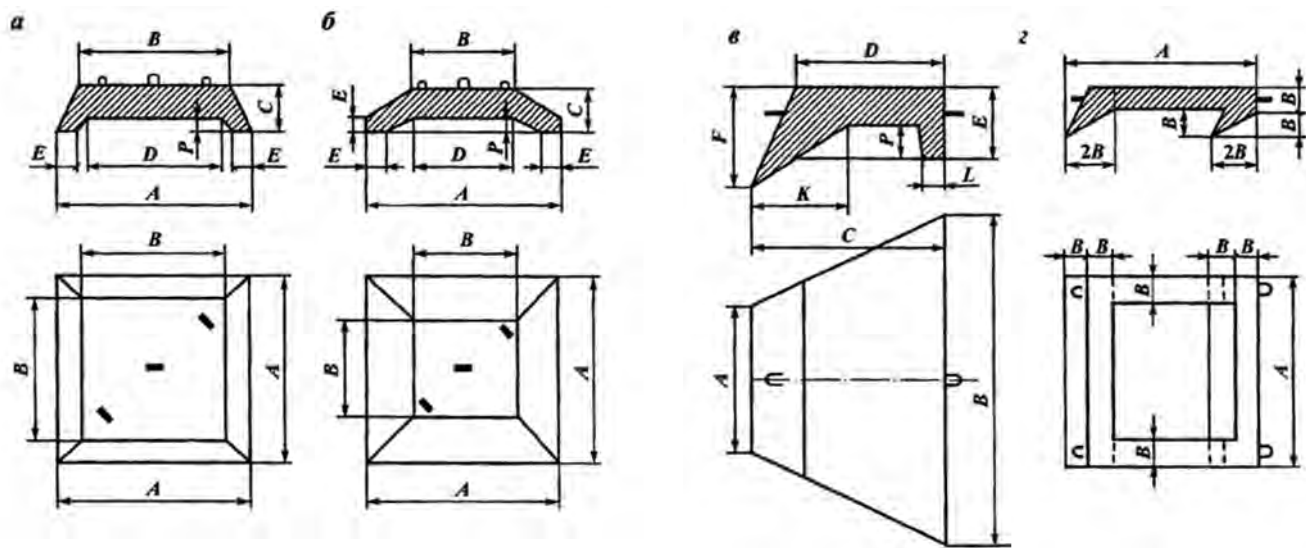
Кроме того, при капитальном ремонте подземных трубопроводов в обводненных грунтах и на болотах усилие

Таблица 1

Коэффициент силы присоса, используемый в практике судоподъемных работ

Грунт	ϕ , град	k_n
Скала с галькой и крупным песком	45	0,05
Гравийная масса	30	0,15
Песок:		
крупный,	36	0,1
средне- и мелкозернистый,	26	0,2
пылеватый с подстилающей глиной	20	0,25
Глина:		
тонкая ползучая,	16	0,3
вязкая тугопластичная	15	0,45

Рис. 1. Конструктивные схемы якорей: а – пирамидальные; б – плитовидные; в – «лягушка»; г – «лягушка» с двумя ножами



подъема ремонтируемого участка труб оказывается большим, чем при подъеме труб в обычных условиях в 1,5–2 раза. Приведенные выше примеры являются нежелательными последствиями присоса при приложении к грунту отрывных усилий.

Наиболее полное математическое описание явления присоса изложено в трудах П.П. Бородавкина [1]. В качестве расчетной модели грунта принимается двухфазный грунт (твердые частицы – вода). Эта модель подтверждает то действительное условие, что присос проявляется главным образом на водонасыщенных грунтах.

Авторами статьи [5] было предложено использовать явление присоса в качестве основной удерживающей силы в устройстве так называемого вакуумного анкера для удерживания магистральных трубопроводов на обводненных и

болотистых грунтах в проектное положение. Схема устройства приведена на рис. 2.

Устройство работает следующим образом. Открытый снизу корпус 1 предварительно углубляют в водонасыщенный грунт, вместе с тем образуется вакуумная камера, ограниченная снизу поверхностью грунта, сверху заглушкой 5, по бокам – стенками корпуса; через клапан 3 производится откачка воздуха. При этом в камере анкера происходит разрежение, и стенки корпуса дополнительно погружаются в грунт под действием давления на корпус. С помощью вакуумметра 4 контролируем давление в вакуумной камере; откачка осуществляется до тех пор, пока анкер не погрузится на требуемую глубину и давление не достигнет проектного.

Анкерное устройство удерживает трубопровод с помощью следующих сил: собственный вес анкера, трение внутренней и внешней поверхностей о грунт, сила, обусловленная разницей давления в вакуумной камере и атмосфере.

Удерживающая способность устройства:

$$F = G + F_{\text{тр}} + P - Q, \quad (3)$$

где G – собственный вес анкера, H ; $F_{\text{тр}}$ – сила трения грунта о поверхность устройства, H ; P – сила присоса, H ; Q – выталкивающая сила, H .

Рассмотрим каждый из силовых факторов, влияющих на удерживающую способность.

Собственный вес анкера:

$$G = 0,25 \cdot \pi \cdot (D_{\text{н}}^2 - D_{\text{вн}}^2) \cdot h \cdot \gamma_{\text{м}}, \quad (4)$$

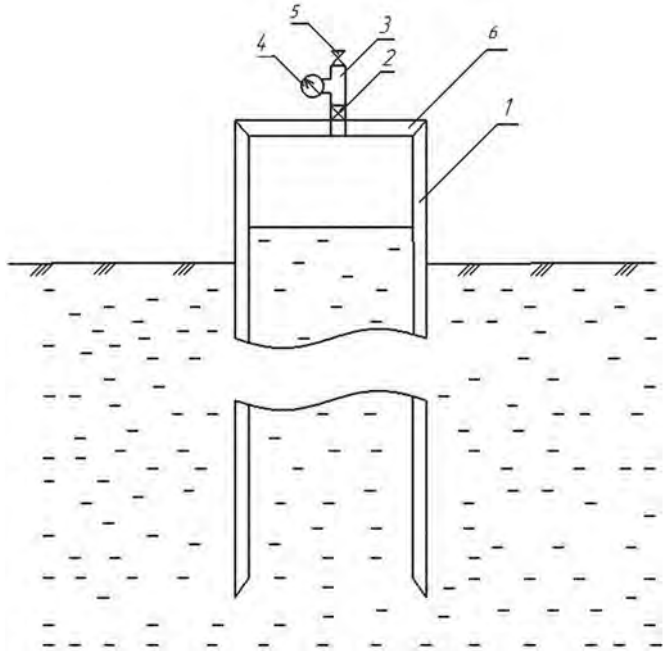
где $D_{\text{н}}$ и $D_{\text{вн}}$ – внешний и внутренний диаметры вакуумной камеры; h – полная длина анкера, м; $\gamma_{\text{м}}$ – удельный вес металла, кг/м³.

Силы трения о цилиндрические поверхности анкера вычисляются по известным из механики соотношениям:

$$F_{\text{тр}} = S_{\text{н}} \cdot \tau_{\text{акт}} = \pi \cdot D_{\text{н}} \cdot (h - h_1) \cdot \tau_{\text{акт}}, \quad (5)$$

где $S_{\text{н}}$ – площади наружных поверхностей анкера, м²; h_1 – высота вакуумной камеры, м; $\tau_{\text{акт}}$ – касательное напряжение на поверхности анкера, Па.

Рис. 2. Конструкция вакуумного анкерного устройства



$$\tau_{\text{акт}} = e_{\text{акт}} \cdot tg\varphi = \left[\gamma_{\text{гр}} (h - h_1) \cdot tg^2 \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) - 2c \cdot tg \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) \right] tg\varphi, \quad (6)$$

где φ – угол внутреннего трения грунта, град.; c – сцепление грунта, Па; $\gamma_{\text{гр}}$ – удельный вес грунта, кН/м³.

Сила присоса:

$$P = (p_{\text{атм}} - p_{\text{вак}}) \cdot S = (p_{\text{атм}} - p_{\text{вак}}) \cdot \pi \cdot (D_{\text{вн}} \cdot h_1 + \frac{D_{\text{вн}}^2}{4}) \quad (7)$$

где $p_{\text{атм}}$ – атмосферное давление, Па; $p_{\text{вак}}$ – давление внутри вакуумной камеры, Па; S – площадь внутренней поверхности вакуумной камеры.

Выталкивающая сила воды, действующая на анкерное устройство, обусловленная архимедовой силой:

$$Q = \pi \cdot g \cdot \frac{D_{\text{н}}^2 - D_{\text{вн}}^2}{4} \cdot h \cdot \rho_{\text{в}}, \quad (8)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²; $\rho_{\text{в}}$ – плотность воды с учетом растворенных в ней солей, кг/м³.

Для предварительного расчета удерживающей способности вакуумного анкерного устройства зададимся следующими усредненными исходными данными:

диаметр $D_{\text{н}} = 219$ мм; толщина стенки $\delta = 4$ мм; длина анкера $h = 3000$ мм; высота вакуумной камеры $h_1 = 300$ мм; атмосферное давление $P_{\text{атм}} = 101\,325$ Па; давление в камере $P_{\text{вак}} = 76\,325$ Па; удельный вес металла $\gamma_{\text{м}} = 78,5$ кН/м; вид грунта – суглинок; удельный вес грунта $\gamma_{\text{гр}} = 19$ кН/м; сцепление грунта $c = 2500$ Па; угол внутреннего трения $\varphi = 30$ град.

Собственный вес анкера:

$$G = 0,25 \cdot \pi \cdot (0,219^2 - 0,211^2) \cdot 3 \cdot 78500 = 636,3 \text{ Н.}$$

Силы трения о цилиндрические поверхности анкера:

$$\tau_{\text{акт}} = \left[\begin{aligned} &19000 \cdot (3 - 0,3) \cdot tg^2 \left(45 - \frac{30}{2} \right) - \\ &- 2 \cdot 2500 \cdot tg \left(45 - \frac{30}{2} \right) \end{aligned} \right] \cdot tg30 = 8206 \text{ Н,}$$

$$F_{\text{тр}} = \pi \cdot 0,219 \cdot (3 - 0,3) \cdot 8206 = 15\,243,6 \text{ Н.}$$

Сила присоса:

$$P = (101325 - 76325) \cdot \pi \cdot \left(0,211 \cdot 2,7 + \frac{0,211^2}{4} \right) = 5845,7 \text{ Н.}$$

Выталкивающая сила воды:

$$Q = 1000 \cdot \pi \cdot 9,81 \cdot \frac{0,219^2 - 0,211^2}{4} \cdot 2,7 = 71,5 \text{ Н.}$$

Тогда удерживающая способность вакуумного анкерного устройства при заданных параметрах:

$$F = G + F_{\text{акт}} + P - Q = 636,3 + 15243,6 + 5845,7 - 71,5 = 21654,1 \text{ Н.}$$

В дальнейших расчетах за основную силу примем фактор, с помощью которого анкерное устройство обеспечивает устойчивость трубопровода в слабонесущих грунтах, – силу присоса и трение наружной поверхности устройства о грунт.

График зависимости удерживающей способности от наружного диаметра вакуумного анкерного устройства при

Рис. 3. График зависимости F от D_a при средних значениях

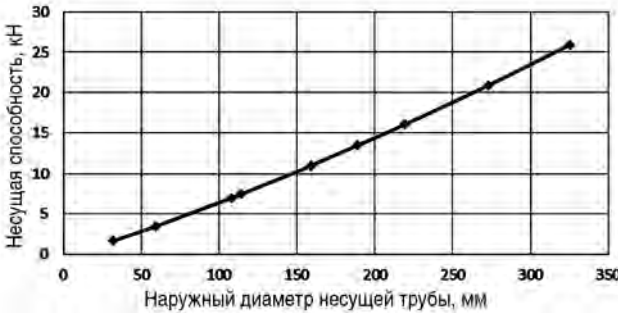
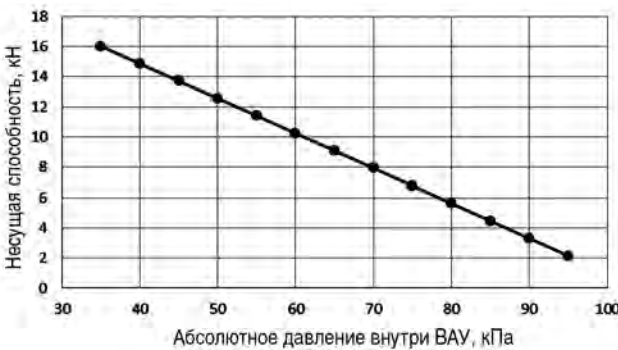


Рис. 4. График зависимости F от $P_{\text{авс}}$



значениях высоты вакуумной камеры $h_1 = 300$ мм, абсолютного давления внутри камеры $P_{\text{вак}} = 76\,325$ Па, диаметра несущей трубы $D_a = 32 \dots 325$ мм изображен на рис. 3.

Зависимость носит параболический характер: чем больше диаметр устройства, тем больше его удерживающая способность. Так, при увеличении диаметра в 10 раз удерживающая способность увеличивается в 15,6 раза.

Зависимость удерживающей способности от абсолютного давления внутри камеры вакуумного устройства, создающегося специальными насосами, при значениях высоты вакуумной камеры $H_b = 300$ мм, диаметра устройства $D_a = 219$ мм показана на рис. 4.

Рис. 5. Зависимость удерживающей способности устройства от угла внутреннего трения и сцепления

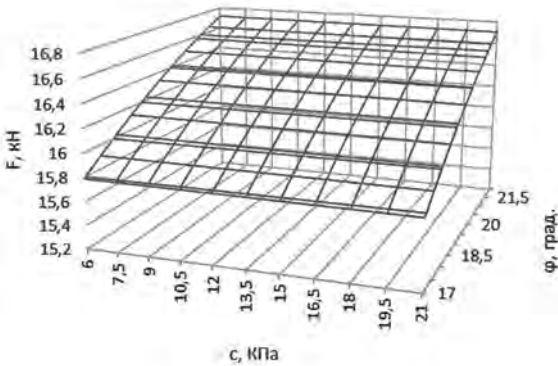


Рис. 6. Зависимость удерживающей способности устройства от угла внутреннего трения и удельного веса грунта

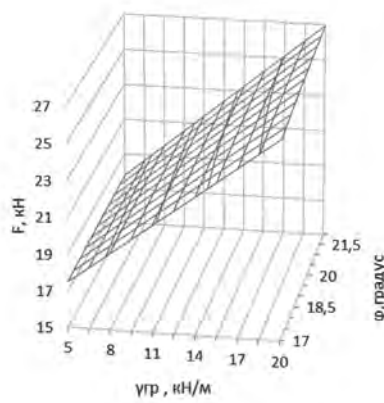


Рис. 7. Зависимость удерживающей способности анкерного устройства от удельного веса грунта и диаметра при $\Delta P = 15$ кПа

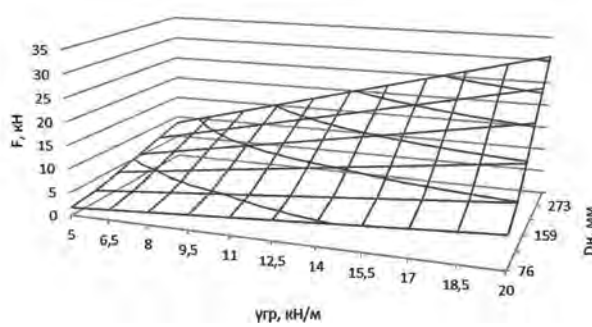


Рис. 8. Зависимость удерживающей способности анкерного устройства от удельного веса грунта и диаметра при $\Delta P = 35$ кПа

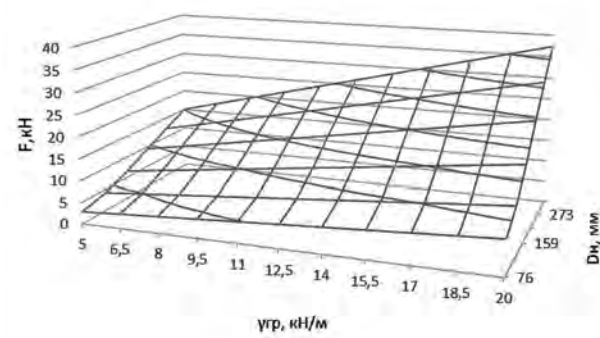
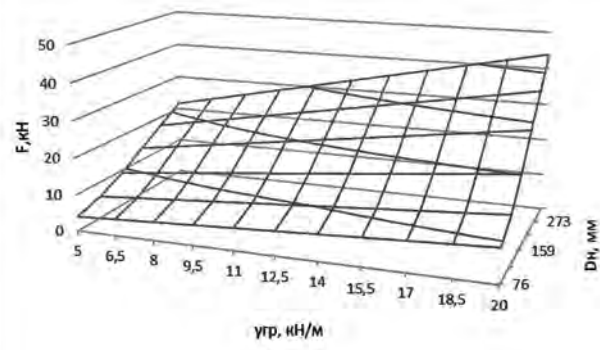


Рис. 9. Зависимость удерживающей способности анкерного устройства от удельного веса грунта и диаметра при $\Delta P = 55$ кПа



По рисунку видно, что чем меньше абсолютное давление внутри вакуумной камеры, то есть чем больше разница между атмосферным и давлением внутри камеры (ΔP), тем больше удерживающая способность вакуумного анкерного устройства. При увеличении разницы давлений на 60 кПа удерживающая способность увеличивается в 8 раз. Подбор оптимальных значений переменных факторов зависит от конкретного случая использования устройства.

Далее произведем расчет удерживающей способности устройства в зависимости от параметров грунта. Для этого зададимся следующими характеристиками: грунт – суглинок влажный; удельный вес грунта $\gamma_{гр} = 17$ кН/м. Значения сцепления грунта и угла внутреннего трения будем изменять в следующих интервалах в соответствии с выбранным грунтом с шагом 0,5: $c = [6 \dots 21]$ кПа, $\phi = [17 \dots 22]$ град. Для каждой пары значений ϕ и c вычисляем удерживающую способность анкерного устройства и по полученным данным строим трехмерный график (рис. 5).

Как видно из графика (см. рис. 5), при увеличении сцепления на 15 кПа удерживающая способность устройства повышается на 1,2%, а изменение угла внутреннего трения на 4,5 градуса вызывает изменение удерживающей способности на 6,3%, следовательно, значение сцепления на удерживающую способность анкера невелико, поэтому можно произвести расчет удерживающей способности в

зависимости от угла внутреннего трения и удельного веса грунта. Результаты расчетов приведены на рис. 6.

Как видно из графика, изменение угла внутреннего трения вызывает несущественное отклонение значения удерживающей способности устройства, а при увеличении удельного веса грунта $\gamma_{гр}$ в 4 раза удерживающая способность изменяется на 60%. Из этого следует, что угол внутреннего трения влияет на удерживающую способность незначительно.

Дальнейший расчет удерживающей способности продолжим в зависимости от трех наиболее значимых параметров – удельного веса грунта, диаметра анкерного устройства и давления в вакуумной камере. Для этого при трех разных значениях $\Delta P = \{15, 35, 55\}$ кПа построим трехмерные графики зависимости удерживающей способности вакуумного анкерного устройства от диаметра и удельного веса грунта (рис. 7–9).

По полученным графикам можно судить, что при использовании в строительстве трубопроводов вакуумных анкерных устройств их характеристики, такие как диаметр, длина, давление в вакуумной камере, будут зависеть от конкретных условий строительства (диаметр трубопровода, вид грунта, вид перекачиваемого продукта), а основным показателем будет являться шаг расстановки вакуумных анкерных устройств по длине трубопровода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бородавкин П.П. Механика грунтов: учеб. для вузов. М.: Недра, 2003. 349 с.
2. Гольдин Э.Р., Козлов М.А., Челышев Ф.П. Подводно-технические аварийно-спасательные работы: справ. М.: Транспорт, 1990. 335 с.
3. Бородавкин П.П. Морские нефтегазовые сооружения: учеб. для вузов. Ч. 1. Конструирование. М.: Недра, 2006. 555 с.
4. Быков Л.И., Мустафин Ф.М., Рафиков С.К. и др. Типовые расчеты при сооружении газонефтепроводов: учеб. пособ. для вузов. СПб.: Недра, 2011. 748 с.
5. Гулин Д.А., Шамилов Х.Ш., Хасанов Р.Р., Султанмагомедов С.М. О закреплении подземных магистральных трубопроводов на болотах // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2015. № 3. С. 330–345.

CALCULATION OF THE CARRYING CAPACITY OF THE VACUUM ANCHOR DEVICE

GULIN D.A., Postgraduate Student of the Department of Construction and Repair of Oil and Gas Pipelines and Gas and Oil Storage Facilities

SALIKHOV B.I., Student

SULTANMAGOMEDOV T.S., Student

SULTANMAGOMEDOV S.M., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Dean of the Faculty of Pipeline Transport

Ufa State Petroleum Technological University (USPTU) (1, Kosmonavtov St., 450062, Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia). E-mail: denis.ufa@list.ru

ABSTRACT

One of the most important tasks of pipeline construction is to hold pipelines in the design position, as the loss of stability of the operated oil and gas pipelines is quite common when laying in wetlands, permafrost and at the crossings of water obstacles. In turn, the phenomenon of suction of the body to the ground is one of the forces which made possible the solution of the problem. The authors of the article suggest to use the vacuum anchor device for anchoring the pipeline in the design position. The article identifies the design load and impact, which is provided by the bearing capacity of the device and the calculations of the bearing capacity, by the results of which the conclusion is made about the possibility of using this device in different soils and given the scope of these devices.

Keywords: trunk pipeline, means of ballasting, anchoring devices, anchors, vacuum anchor device, the stability of the pipelines.

REFERENCES

1. Borodavkin P.P. *Mekhanika gruntov* [Soil mechanics]. Moscow, Nedra Publ., 2003. 349 p.
2. Gol'din E.R., Kozlov M.A., Chelyshev F.P. *Podvodno-tekhnicheskiye avariyno-spasatel'nyye raboty* [Underwater technical emergency rescue operations]. Moscow, Transport Publ., 1990. 335 p.
3. Borodavkin P.P. *Morskiye neftegazovyye sooruzheniya. Chast' 1. Konstruirovaniye* [Marine oil and gas facilities. Part 1. Designing]. Moscow, Nedra Publ., 2006. 555 p.
4. Bykov L.I., Mustafin F.M., Rafikov S.K. *Tipovyye raschety pri sooruzhenii gazonefteprovodov* [Typical calculations for the construction of gas and oil pipelines]. Saint Petersburg, Nedra Publ., 2011. 748 p.
5. Gulin D.A., Shamilov KH.SH., Khasanov R.R., Sultanmagomedov S.M. On the securing of underground trunk pipelines in swamps. *Neftegazovoye delo*, 2015, no. 3, pp. 330–345 (In Russian).

