УДК 624.15(035.5)

Особенности проектирования опускных колодцев в грунтовых условиях Санкт-Петербурга

Андрей Александрович АНАНЬЕВ, кандидат технических наук, доцент, e-mail: andrej.3@mail.ru

ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский архитектурно-строительный университет»,
190005 Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4

Аннотация. *Рассмотрены особенности геологического строения Санкт-Петербурга, осложняющие подземное строительство. Обобщен опыт строительства заглубленных сооружений в грунтовых условиях города. Выявлены причины, затрудняющие погружение крупных опускных колодцев. Обоснованы технологические решения, направленные на облегчение погружения и удержания от всплытия опускного колодца, выправление его крена и устранение зависания. Представлен анализ расчетов опускных колодцев на строительные и эксплуатационные нагрузки. Разработана четырехъярусная конструктивная схема опускного колодца диаметром 24 м и глубиной 15,6 м под заглубленное сооружение. Приведены методика и результаты расчетов основания сооружения на основе обязательных требований сводов правил. Выполнены проверки на погружение и всплытие колодца. Даны рекомендации по проектированию и устройству опускных колодцев в слабых водонасыщенных глинистых грунтах.*

Ключевые слова: *опускной колодец, ярус, тиксотропная рубашка, трение грунта, предельная нагрузка на грунт, расчет на погружение, расчет на всплытие, тампонаж тиксотропной полости, пригрузка против всплытия.*

FEATURES OF DESIGN OF A SUNK WELL UNDER THE SOIL CONDITIONS OF ST. PETERSBURG

Andrei A. ANANEV, e-mail: andrej.3@mail.ru

Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2-ya Krasnoarmeiskaya ul., 4,
St. Petersburg 190005, Russian Federation

Abstract. *Peculiarities of the geological structure of St. Petersburg, complicating underground construction, are considered. The experience in construction of embedded structures under the soil conditions of the city is summed up. The reasons that hinder the advancement of large sunk wells are established. Technological solutions aimed at facilitating the immersion and retention of the sunk well from floating up, straightening its roll and eliminating the hanging are substantiated. The analysis of calculations of sunk wells for building and operation loads is presented. The four-tier structural scheme of the sunk well of 24 m diameter and 15.6 m depth for embedded structures has been developed. The methodology and results of calculations of the structure base on the basis of mandatory requirements of the codes are presented. Tests for immersion and floating up of sunk wells have been performed. Recommendations on design and construction of sunk wells in weak water-saturated clayey soils are made.*

Key words: *sunk well, thixotropic jacket, soil friction, ultimate load on soil, calculation for immersion, calculation for floating up, tamponage of thixotropic cavity, surcharge against floating up.*

Строительство уникальных сооружений, отвечающих требованиям безопасности в сложных инженерно-геологических условиях, невозможно без изучения напряженно-деформированного состояния грунтов. Практические способы расчета оснований, возводимых методом опускного колодца, регламентируются положениями СП 43.13330.2012 «СНиП 2.09.03-85 Сооружения промышленных предприятий», которые прогнозируют прочность грунта в точке, взаимодействующей с сооружением. Однако при погружении крупных опускных колодцев в грунты нередко происходят характерные осложнения, такие как крен, зависание, самопроизвольное погружение и всплытие конструкции, обусловленные ошибками в оценке геологических и техногенных условий строительной площадки, недостоверным прогнозом работы основания опускного колодца под нагрузкой, нарушением технологии производства работ [1].

При выполнении геотехнических расчетов часто требуется детализация некоторых положений строительных норм на примерах, особенно при проектировании сооружений повышенной ответственности и на специфических грунтах. Однако материалы по вопросам проектирования и строительства заглубленных сооружений методом опускного колодца в настоящее время практически отсутствуют. В этой связи поставлена задача упростить использование СП 43.13330.2012 по проектированию и устройству опускных колод-

© АНАНЬЕВ А. А., 2016

цев с учетом особенностей проектирования их оснований.

Цель работы — расчет конструктивной схемы опускного колодца, возводимого в грунтовых условиях Санкт-Петербурга, под заглубленное сооружение внутренним диаметром 24 м и высотой 15,6 м. Методика исследования включала в себя обзор строительства опускных колодцев, анализ инженерно-геологических условий, конструирование и расчет опускного колодца.

Обзор строительства опускных колодцев. Опыт устройства крупногабаритных опускных колодцев в Санкт-Петербурге показал, что для резкого снижения сил бокового трения эффективно применение тиксотропной рубашки из бентонитового раствора, которым заполняют полость между стеной колодца и грунтом. Для предотвращения проникания в котлован раствора устроили глиняный замок над уступом ножа, а для защиты от грунтовых вод — ледогрунтовую стенку по периметру колодца [2]. Использование электроосмотической установки при погружении колодца в глинистых и мелкопесчаных грунтах позволяет целенаправленно изменять силы трения на боковой поверхности ножа. Под воздействием постоянного электрического поля, приводящим к движению грунтового раствора от анодного электрода к катоду, силы трения грунта в ножевой части колодца были снижены на 60—85 %, осуществлена посадка колодца до 0,43 м без разработки грунта внутри него, исправлены перекосы колодца до 0,15 м [3]. Случай выпора грунта в котлован зафиксирован при погружении колодца в глинистых грунтах текучепластичной и текучей консистенции. Следствием этого явилось неконтролируемое опускание конструкции и деформации окружающего сооружение грунтового массива. Произвольное погружение колодца удалось остановить путем цементации грунта в зоне выпора способом струйной технологии и анкеровкой колодца [4]. В водонасыщенных грунтах в случае, если веса колодца и сил трения было недостаточно для удержания его от всплытия, осуществляли закрепление сооружения до устройства днища и отключения водопонизительной системы. Применяли следующие мероприятия, препятствующие всплытию колодца:

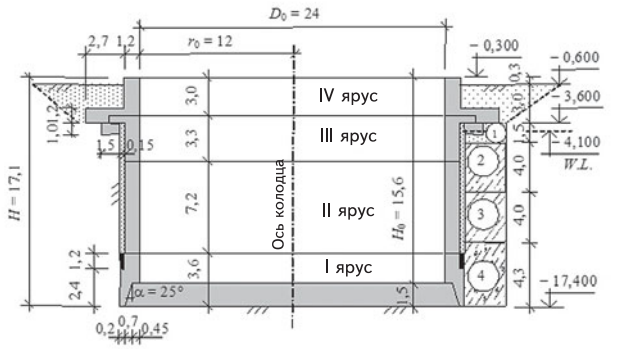
- тампонаж полости тиксотропной рубашки цементно-песчаным раствором с вытеснением глинистого раствора;
- устройство в верхней части колодца воротника, нагруженного песчаной засыпкой;
- установку горизонтальных и вертикальных анкеров;
- создание несимметричной нагрузки при выравнивании крена колодца с помощью воротника [5].

Описание геологического строения. В геоморфологическом отношении участок строительства приурочен к дельте р. Невы с абсолютными отметками поверхности 2,7—3,7 м. Грунтовые воды со свободной поверхностью вскрыты на глубинах 3—3,5 м [6]. Геологическое строение участка представлено комплексом четвертичных отложений, подстилаемым на глубине 20—23 м коренными породами протерозойского возраста:

- *техногенные отложения* мощностью 0,9—2,5 м, неоднородные по составу и физико-механическим свойствам, перелопаченные супеси и пески с включением строительного мусора;
- *позднеледниковые отложения*: морские и озерные — пылеватые пески средней плотности, насыщенные водой, с включением растительных остатков и прослоями супеси (ИГЭ-1, $\gamma_1 = 19$ кН/м^3; $e = 0{,}7$; $\varphi_1 = 25°$; $c_1 = 2$ кПа; $w = 0{,}22$; $S_r = 0{,}83$), подстилаемые пылеватыми супесями пластичной консистенции мощностью 2,5—6,5 м (ИГЭ-2, $\gamma_2 = 19$ кН/м^3; $e = 0{,}9$; $\varphi_2 = 14°$; $c_2 = 10$ кПа; $I_L = 0{,}9$; $w = 0{,}3$; $S_r = 0{,}93$); озерно-ледниковые — легкие пылеватые ленточные и слоистые суглинки текучей консистенции мощностью 1,6—6 м (ИГЭ-3, $\gamma_3 = 19$ кН/м^3; $e = 0{,}95$; $\varphi_3 = 12°$; $c_2 = 8$ кПа; $I_L = 1{,}1$; $w = 0{,}34$; $S_r = 0{,}97$);
- *ледниковые отложения* — пылеватые твердые супеси с включением гальки и гравия с редкими валунами, неоднородные по составу, слабой степени литификации (ИГЭ-4, $\gamma_4 = 22$ кН/м^3; $e = 0{,}4$; $\varphi_4 = 23°$; $c_4 = 27$ кПа; $I_L = -0{,}08$; $w = 0{,}13$; $S_r = 0{,}89$);
- *коренные породы* — пылеватые твердые дислоцированные глины с обломками песчаника, редким гравием и галькой, приуроченные к пылеватым пескам средней плотности.

Анализ инженерно-геологических условий участка строительства позволил установить следующие факторы, осложняющие проектирование и строительство опускного колодца. Геологический разрез неоднородный по простиранию и мощности, выделенные инженерно-геологические элементы (ИГЭ) имеют неоднородный вещественный состав. Грунтовая толща на глубину 10—12 м характеризуется как слабая, водонасыщенная, обладающая плывунными и тиксотропными свойствами.

Описание конструктивных решений. Монолитный железобетонный опускной колодец запроектирован из тяжелого бетона плотностью 2400 кг/м^3 класса В25, марки W6. Толщина стены колодца — 1,2 м, плиты днища — 1,5 м, высота ножевой части — 2,4 м, уплотнителя (глиняного замка) — 1,2 м, ширина режущей части ножа (банкетки) — 0,2 м, наружного уступа ножа — 0,15 м, угол наклона внутренней грани ножа — $\alpha = 25°$, зазор между гранями форшахты и ножа — 0,05 м.



1 – водонасыщенный пылеватый песок средней плотности; 2 – пылеватая пластичная супесь; 3 – пылеватый текучий суглинок; 4 – твердая супесь с гравием и галькой

Рис. 1. ***Вертикальное сечение опускного колодца***

Колодец заглубляется через форшахту размером 1,5×1 м со дна пионерного котлована глубиной 3 м тремя ярусами высотой 3,6; 7,2 и 3,3 м в тиксотропной рубашке. Четвертый ярус высотой 3 м с монолитным воротником сечением 2,7×1,2 м надстраивается сверху. Предусмотрены открытый водоотлив и гидроизоляция стен днища колодца [7]. Пригрузку колодца против возможного всплытия обеспечивает тампонаж полости цементно-песчаным раствором с вытеснением глинистого раствора весом воротника, нагруженного песчаной засыпкой и присоединенного к форшахте в соответствии с СП 45.13330.2012 «СНиП 3.02.01-87 Земляные сооружения, основания и фундаменты». Схема опускного колодца, совмещенная с напластованием грунтов, приведена на *рис. 1.*

Расчет основания. Опускные колодцы рассчитывают на нагрузки и воздействия, возникающие при строительстве и эксплуатации. В процессе выполнения расчетов прочности основания при погружении и всплытии колодца определяют его оптимальные размеры, необходимость анкеровки конструкции, усилия прочности ножа, стен и днища. При этом необходимо учитывать мероприятия по облегчению погружения конструкции в грунт и удержанию ее от всплытия.

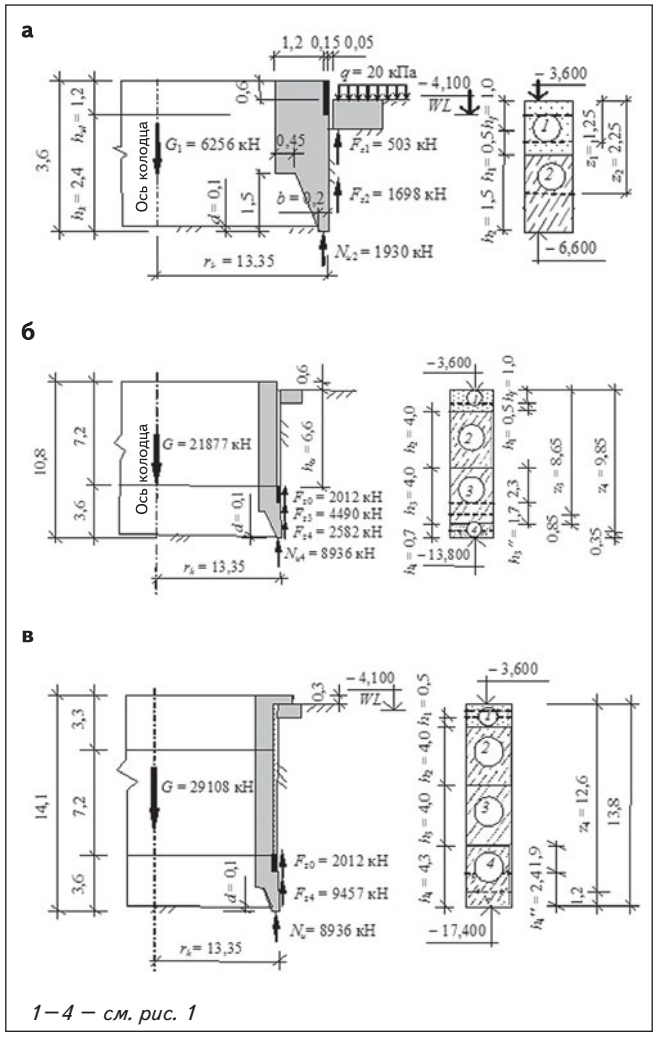
Расчет колодца на погружение. Вес I яруса колодца G_{w1} и уплотнителя G_{sl} находим по формулам:

$$G_{w1} = \gamma_f V_{w1} \gamma_b = 0{,}9 \cdot 278{,}4 \cdot 24 = 6013 \text{ кН};$$

$$G_{sl} = \gamma_f V_{sl} \gamma_{sl} = 0{,}9 \cdot 15 \cdot 18 = 243 \text{ кН},$$

где γ_f – коэффициент надежности по нагрузке, $\gamma_f = 0{,}9$; γ_b и γ_{sl} – удельный вес бетона и уплотнителя, $\gamma_{sl} = 18$ кН/м^3, $\gamma_b = 24$ кН/м^3; V_{w1} – объем I яруса колодца, $V_{w1} = 278{,}4$ м^3; V_{sl} – объем уплотнителя, $V_{sl} = 15$ м^3.

На отметке –6,600, соответствующей максимальной глубине погружения I яруса колодца в грунт, на



1–4 – см. рис. 1

Рис. 2. ***Определение сил сопротивления грунтов при погружении I яруса (а), I и II ярусов (б) и I, II и III ярусов колодца (в)***

боковой поверхности ножа действуют силы трения: F_{z1} – пылеватого песка средней плотности мощностью $h_1 = 0{,}5$ м; F_{z2} – пылеватой пластичной супеси мощностью $h_2 = 1{,}5$ м, а также предельное сопротивление N_{u2} пылеватой пластичной супеси *(рис. 2а).*

Вертикальное давление от веса форшахты на грунт заменим эквивалентным слоем пылеватого песка, толщину которого определяем по формуле (26) СП 43.13330.2012

$$h_1' = \gamma_b h_f / \gamma_1 = 24 \cdot 1{,}0/19 = 1{,}26 \text{ м}.$$

По табл. 6 СП 43.13330.2012 путем интерполяции рассчитаем среднюю приведенную глубину слоя песка $z_1' = h_1' + 0{,}5h_1 = 1{,}26 + 0{,}5 \cdot 0{,}5 = 1{,}51$ м и значения коэффициентов $k_1 = 0{,}04$; $k_2 = 0{,}37$; $k_3 = 1{,}32$ в зависимости от угла внутреннего трения грунта $\varphi_1 = 25°$ и относительной глубины $z_1'/r_k = 1{,}51/13{,}35 = 0{,}11$. Активное давление песка

1. Силы трения грунтов на боковой поверхности ножа

Грунт	Мощность слоя h, м	Средняя глубина слоя z_h, м	Относительная глубина z'_i/r_k	Коэффициенты активного давления грунта			Основное давление грунта p_{hi}, кПа	Сила трения грунта F_{zi}, кН
				k_{1i}	k_{2i}	k_{3i}		
Песок (ИГЭ-1)	0,5	1,25	0,11	0,04	0,37	1,32	25	503
Пластичная супесь (ИГЭ-2)	1,5	2,25	0,19	0,1	0,59	1,73	42,7	1698
Текучий суглинок (ИГЭ-3)	1,7	8,65	0,67	0,39	0,55	2,26	123,6	4490
Твердая супесь (ИГЭ-4)	0,7	9,85	0,66	0,22	0,3	1,68	89,9	2582
	2,4	12,6	0,72	0,24	0,28	1,7	97,2	9457

2. Силы сопротивления грунтов под банкеткой ножа

Грунт	Глубина погружения колодца z, м	Боковая пригрузка q, кПА	Коэффициенты несущей способности грунта			Предельное давление p_{hi}, кПа	Предельная нагрузка N_{ui}, кН
			$N_{\gamma i}$	N_{qi}	N_{ci}		
Пластичная супесь (ИГЭ-2)	3	1,9	1,2	3,65	10,45	116	1930
Твердая супесь (ИГЭ-4)	10,2	2,2	4,64	8,96	18,39	537	8936
	13,8						

пылеватого на боковой поверхности ножа на глубине $z_1 = 1{,}25$ м от поверхности дна котлована с учетом нагрузки $q = 20$ кПа (п. 5.4.9б СП 43.13330.2012) составит:

$$\overline{p}_{h1} = \gamma_1 r_k k_1 + q k_2 - c_{02} k_3 = 19 \cdot 13{,}35 \cdot 0{,}04 + 20 \cdot 0{,}37 - 0 \cdot 1{,}32 = 17{,}6 \text{ кПа}.$$

Основное горизонтальное давление грунта найдем из выражения (24) СП 43.13330.2012 с учетом величины угла внутреннего трения грунта на боковой поверхности ножа $\varphi_{01} = \varphi_1 = 25^\circ$

$$p_{h1} = \frac{\overline{p}_{h1} + c_{01}\text{tg}(45^\circ - \varphi_{01}/2)}{1 - \text{tg}\varphi_{01}\text{tg}(45^\circ - \varphi_{01}/2)} = \frac{17{,}6 + 0 \cdot \text{tg}(45^\circ - 25^\circ/2)}{1 - \text{tg}25^\circ \text{tg}(45^\circ - 25^\circ/2)} = \frac{17{,}6 + 0}{1 - 0{,}4663 \cdot 0{,}6371} = 25 \text{ кПа}.$$

Далее вычислим удельное трение пылеватого песка f_{z1} на боковой поверхности ножа по формуле (36) СП 43.13330.2012 с коэффициентом условий работы $\gamma_c = 1$

$$f_{z1} = \gamma_c(p_{h1}\text{tg}\varphi_{01} + c_{01}) = 1 \cdot (25 \cdot 0{,}4663 + 0) = 12 \text{ кПа}.$$

Силу трения слоя песка F_{z1} рассчитаем по зависимости (35) СП 43.13330.2012

$$F_{z1} = f_{z1} u h_1 = 12 \cdot 83{,}84 \cdot 0{,}5 = 503 \text{ кН},$$

где u – длина окружности ножевой части колодца, $u = 2\pi r_k = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 13{,}35 = 83{,}84$ м.

Для пластичной супеси по аналогии определим *(см. рис. 2а):*

- приведенную высоту лежащих выше слоев бетона и песка

$$h'_2 = (\gamma_b h_f + \gamma_1 h_1)/\gamma_2 = (24 \cdot 1 + 19 \cdot 0{,}5)/19 = 1{,}76 \text{ м};$$

- среднюю приведенную и относительную глубину слоя:

$$z'_2 = h'_2 + 0{,}5h_2 = 1{,}76 + 0{,}5 \cdot 1{,}5 = 2{,}51 \text{ м};$$

$$z'_2/r_k = 2{,}51/13{,}35 = 0{,}19;$$

- путем интерполяции коэффициенты $k_1 = 0{,}1$; $k_2 = 0{,}59$; $k_3 = 1{,}73$ (табл. 6, СП 43.13330.2012) при $\varphi_2 = 14^\circ$ и $z'_2/r_k = 0{,}19$;
- удельное сцепление c_{02} и угол внутреннего трения φ_{02} на контакте со стеной в период погружения колодца при $k = 0{,}29$ (табл. 5, СП 43.13330.2012)

$$c_{02} = c_2 k = 10 \cdot 0{,}29 = 2{,}9 \text{ кПа}; \varphi_{02} = \varphi_2 = 14^\circ;$$

- активное давление на боковой поверхности ножа в точке на глубине $z_2 = 2{,}25$ м

$$\overline{p}_{h2} = \gamma_2 r_k k_1 + q k_2 - c_{02} k_3 = 19 \cdot 13{,}35 \cdot 0{,}1 + 20 \cdot 0{,}59 - 2{,}9 \cdot 1{,}73 = 32{,}1 \text{ кПа};$$

- основное горизонтальное давление грунта

$$p_{h2} = \frac{\overline{p}_{h2} + c_{02}\text{tg}(45^\circ - \varphi_{02}/2)}{1 - \text{tg}\varphi_{02}\text{tg}(45^\circ - \varphi_{02}/2)} = \frac{32{,}1 + 2{,}9 \cdot \text{tg}(45^\circ - 14^\circ/2)}{1 - \text{tg}14^\circ \text{tg}(45^\circ - 14^\circ/2)} = \frac{32{,}1 + 2{,}9 \cdot 0{,}7813}{1 - 0{,}2493 \cdot 0{,}7813} = 42{,}7 \text{ кПа};$$

- удельное трение f_{z2}

$f_{z2} = \gamma_c(p_{h2}\text{tg}\varphi_{02} + c_{02}) = 1 \cdot (42{,}7 \cdot 0{,}2493 + 2{,}9) = 13{,}5$ кПа.

Силу трения слоя супеси пластичной F_{z2} по боковой поверхности ножа *(см. рис. 2а)* получаем из выражения

$$F_{z2} = f_{z2}uh_2 = 13{,}5 \cdot 83{,}84 \cdot 1{,}5 = 1698 \text{ кН}.$$

Предельную нагрузку на основание p_{u2} определяем под банкеткой при глубине погружения ножа в грунт $d = 0{,}1$ м ($d/b = 0{,}1/0{,}2 = 0{,}5$) и боковой пригрузке $q = \gamma_2 d = 19 \cdot 0{,}1 = 1{,}9$ кПа *(рис. 2)* из выражения

$$p_{u2} = N_\gamma \gamma_2 b + N_q q + N_c c_2 = 1{,}2 \cdot 19 \cdot 0{,}2 + 3{,}65 \cdot 1{,}9 + 10{,}45 \cdot 10 = 116 \text{ кПа}.$$

Необходимые для прогноза нагрузки коэффициенты несущей способности $N_\gamma = 1{,}2$; $N_q = 3{,}65$; $N_c = 10{,}45$ находим по табл. 5.12 СП 22.13330.2011 «СНиП 2.02.01-83* Основания зданий и сооружений» при $\varphi_2 = 14^\circ$ и угле отклонения равнодействующей нагрузок от вертикали $\delta = 0$.

Вычисляем вертикальную составляющую силы предельного сопротивления супеси пластичной N_{u2} (формула 5.32, СП 22.13330.2011)

$$N_{u2} = p_{u2}A = 116 \cdot 16{,}64 = 1930 \text{ кН},$$

где A – площадь кольцевой нагрузки, $A = 16{,}64$ м^2.

Проверяем условие погружения I яруса колодца на отм. –6,600 при коэффициенте надежности на погружение $\gamma_{f1} = 1{,}2$

$$\frac{G_{w1} + G_{sl}}{F_{z1} + F_{z2} + N_{u2}} = \frac{6013 + 243}{503 + 1698 + 1930} = \frac{6256}{4131} = 1{,}5.$$

Погружение обеспечивается. Остановка колодца производится с помощью временных упоров.

При погружении II яруса колодца полость вокруг него заполняют тиксотропным раствором удельным весом $\gamma_{ts} = 11{,}5$ кН/м^3. Вес II яруса колодца $G_{w2} = 14764$ кН, тиксотропной рубашки $G_{ts} = 854$ кН.

Удельная сила трения грунта в зоне тиксотропной рубашки не учитывается, в зоне глиняного замка принимают $f_{z0} = 20$ кПа (п. 5.4.19б СП 43.13330.2012).

Усилие трения уплотнителя F_{z0} по грунту определяем при его высоте $h_{sl} = 1{,}2$

$$F_{z0} = f_{z0}uh_{sl} = 20 \cdot 83{,}84 \cdot 1{,}2 = 2012 \text{ кН}.$$

При заглублении I и II ярусов колодца на отм. –13,800 на боковой поверхности ножа действуют силы трения: F_{z3} – текучего суглинка мощностью $h_3'' = 1{,}7$ м; F_{z4} – твердой супеси мощностью $h_4 = 0{,}7$ м; N_{u4} – предельное сопротивление твердой супеси под банкеткой *(рис. 2б).*

Расчет сил трения грунтов F_{z3} *и* F_{z4} выполняем по аналогии с F_{z1} и F_{z2}. При этом принимаем прочностные характеристики грунтов на контакте с боковой поверхностью ножа $c_{03} = c_3 \cdot k = 8 \cdot 0{,}65 = 5{,}2$ кПа; $\varphi_{03} = \varphi_0 = 12^\circ$ и $c_{04} = c_{04} \cdot k = 27 \cdot 0{,}22 = 5{,}9$ кПа; $\varphi_{03} = \varphi_0 = 23^\circ$. Результаты вычислений представлены в *табл. 1.*

Вертикальную составляющую силы предельного сопротивления супеси твердой N_{u4} под банкеткой на отм. –13,800 определяем по аналогии с N_{u2}. Необходимые для прогноза предельной нагрузки на грунт коэффициенты несущей способности $N_{g4} = 4{,}64$, $N_{q4} = 8{,}96$, $N_{c4} = 18{,}39$ находим по табл. 5.12 СП 22.13330.2011 при $\varphi_4 = 23^\circ$ и угле отклонения равнодействующей нагрузок от вертикали $\delta = 0$ путем интерполяции. Результаты вычислений представлены в *табл. 2.*

Проверяем условие (39) СП 43.13330 *погружения I и II яруса колодца* на отм. –13,800:

$$\frac{G_{w1} + G_{w2} + G_{sl} + G_{ts}}{F_{z0} + F_{z3} + F_{z4} + N_{u4}} = \frac{6013 + 14767 + 243 + 854}{2012 + 4490 + 2582 + 8936} = \frac{21877}{18020} = 1{,}21 > 1{,}2.$$

Погружение I и II ярусов колодца обеспечивается.

Наращиваем III ярус колодца и производим его погружение. Вес III яруса $G_{w3} = 6768$ кН, тиксотропной рубашки $G_{ts} = 1320$ кН *(см. рис. 1).*

Для слоя твердой супеси мощностью $h_4'' = 2{,}4$ м, контактирующего с ножевой поверхностью *(рис. 2в),* результаты определения силы трения F_{z4} представлены в *табл. 1,* предельной нагрузки на грунт N_{u4} – в *табл. 2.*

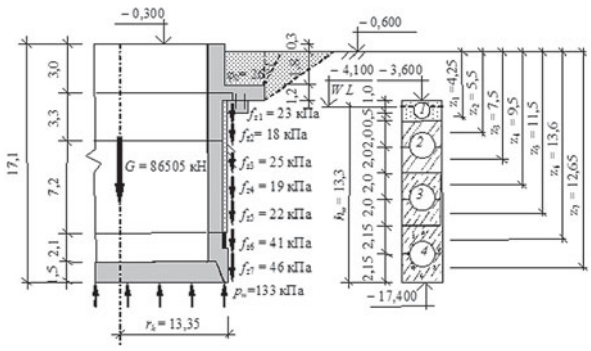
Проверяем условие *погружения I, II и III ярусов колодца* на отм. –17,400:

$$\frac{G_{w1} + G_{w2} + G_{w3} + G_{sl} + G_{ts}}{F_{z0} + F_{z4} + N_{u4}} = \frac{6013 + 14767 + 6768 + 243 + 1320}{2012 + 9457 + 8936} = \frac{29108}{20405} = 1{,}43 > 1{,}2.$$

Погружение колодца обеспечено. Остановка колодца на проектной отметке фиксируется упором консоли в форшахту.

Расчет колодца на всплытие. Колодцы, погружаемые ниже горизонта грунтовых вод, после устройства днища рассчитываются на всплытие в любых грунтах (за исключением случая, когда под днищем выполняется постоянно действующий дренаж).

Вес IV яруса колодца ($G_{w4} = 6152$ кН, воротника $G_{cl} = 6395$ кН, форшахты $G_f = 2848$ кН, тампонажа щели $G_c = 2296$ кН, днища колодца $G_b = 16668$ кН, песчаной засыпки $G_{bf} = 8994$ кН) определяем с коэффициентом надежности по нагрузке $\gamma_f = 0{,}9$.



1 – водонасыщенный пылеватый песок средней плотности; 2 – пылеватая пластичная супесь; 3 – пылеватый текучий суглинок; 4 – твердая супесь с гравием и галькой

Рис. 3. ***Схема к расчету колодца на всплытие***

3. Удельные силы трения грунтов f_{zi} на боковой поверхности

Глубина слоя z_i, м	Толщина слоя h_i, м	Грунт	Удельное трение f_{zfi}, кПа
4,25	0,5	Пылеватый песок	23
5,5	2	Супесь пластичная	18
7,5			25
9,5	2	Суглинок текучий	19
11, 5			22
13, 6	2,15	Супесь твердая	41
15, 7			46

Засыпку воротника производим песком средней крупности (γ_{bf} = 19 кН/м^3; ρ_d = 1,65 г/см^3; φ_I = 32°; e = 0,65; w = 0,16) при послойном уплотнении. Объем тела выпирания засыпки при отклонении ее грани на угол $\varphi_0 = \eta\varphi_I = 0{,}8 \cdot 32^\circ = 26^\circ$ от вертикали *(рис. 3)* при η = 0,8 (табл. 7.1 СП 22.13330.2011) вычисляем по формуле

$$V_{bf} = 3{,}14(16{,}35^2 - 13{,}2^2)1{,}8 = 526 \text{ м}^2.$$

Сумму вертикальных нагрузок находим из выражения

$$\Sigma G = G_{w1} + G_{w2} + G_{w3} + G_{w4} + G_{cl} + G_f + G_c + G_b + G_{sl} + G_{bf} = 6013 + 14764 + 6768 + 6152 + 6395 + 2848 + 2296 + 16668 + 243 + 8994 = 71141 \text{ кН}.$$

Разбиваем грунтовый массив на элементарные слои высотой h_i = 0,5; 2 и 2,15 м *(см. рис. 3).* Удельное трение f_{zfi} грунта на боковой поверхности зацементированной полости в середине каждого слоя на глубине z_i от поверхности засыпки определяем по табл. 2.2 [8] методом линейной интерполяции *(табл. 3).*

Суммарное усилие трения грунтов при всплытии колодца с учетом γ_f = 0,5 [1, 8] составит

$$\Sigma F_z' = \gamma_f u(f_{z1}h_1 + f_{z2}h_2 + f_{z3}h_3 + f_{z4}h_4 + f_{z5}h_5 + f_{z6}h_6 + f_{z7}h_7) = 0{,}5 \cdot 83{,}84(23 \cdot 0{,}5 + 18 \cdot 2 + 25 \cdot 2 + 19 \cdot 2 + 22 \cdot 2 + 41 \cdot 2{,}15 + 46 \cdot 2{,}15) = 15364 \text{ кН}.$$

Проверяем условие (40) СП 43.13330 на всплытие колодца при удельном весе воды γ_w = 10 кН/м^3, высоте столба воды h_w = 13,3 м *(см. рис. 3)* и коэффициенте надежности против всплытия γ_{fw} = 1,2:

$$\frac{\Sigma G + \Sigma F_z'}{A_b h_w \gamma_w} = \frac{71141 + 15364}{560 \cdot 13{,}3 \cdot 10} = \frac{86505}{74480} = 1{,}2,$$

где A_b = 560 м^2 – площадь основания колодца.

Условие выполняется, сооружение устойчиво против всплытия.

В ы в о д ы

1. Неблагоприятными факторами инженерно-геологических условий территории, осложняющими процесс проектирования и строительства заглубленного сооружения, являются неоднородность геологического разреза по простиранию и мощности, высокая степень водонасыщения грунтов, наличие в разрезе текучих грунтов, неоднородность вещественного состава грунтов и высокий уровень грунтовых вод.

2. Разработана конструктивная схема заглубленного сооружения диаметром 26,7 м и высотой 17,1 м, возводимого методом опускного колодца в слабых водонасыщенных грунтах.

3. Рекомендуются следующие мероприятия, направленные на облегчение погружения колодца в грунты и закрепление его от всплытия: опускание колодца со дна пионерного котлована по ярусам; устройство вокруг стены колодца антифрикционной рубашки; применение электроосмотической установки; установка закладных изделий в стене колодца для крепления временных упоров; цементация антифрикционной полости после погружения колодца; устройство по периметру колодца монолитного воротника, жестко связанного с форшахтой; пригрузка колодца песчаной засыпкой.

4. В соответствии со ст. 15 закона от 30.12.2009 г. № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» рекомендуется предусматривать геотехническое сопровождение проектирования и строительства уникального объекта, а также мониторинг вертикальности опускания колодца с целью исключения навала колодца на грунт.

ЛИТЕРАТУРА

1. Основания, фундаменты и подземные сооружения / под общ. ред. В. А. Ильичева, Р. А. Мангушева. М. : АСВ, 2014. 728 с.
2. *Федотов В. А., Алмазов А. Н., Шашков В. А.* [и др.] Исследование технологии погружения и напряженно-деформированного состояния опускного колодца диаметром 66 м, глубиной 68 м при строительстве в грунтовых условиях Ленинграда: Сб. науч. тр. «Технология и оборудование для специальных строительных работ». Л. : ВНИИГС, 1983. С. 38–45.
3. *Алмазов А. Н., Перминов Н. А., Ольшевский Г. Ф., Феоктистова Н. В.* Пути снижения сил трения при погружении опускных колодцев : Сб. науч. тр. «Технология и оборудование для специальных строительных работ». Л. : ВНИИГС, 1982. С. 109–116.
4. *Шашкин К. Г., Маслак Т. В.* Геотехнический анализ аварийной ситуации при погружении опускного колодца в слабых грунтах : Сб. тр. конф. «Актуальные вопросы геотехники при решении сложных задач нового строительства и реконструкции». СПб : СПбГАСУ, 2010. С. 138–143.
5. *Перлей Е. М., Раюк В. Ф., Беленькая В. В., Алмазов А. Н.* Свайные фундаменты и заглубленные сооружения при реконструкции действующих предприятий. Л. : Стройиздат (Ленингр. отд-ние), 1989. 176 с.
6. Проектирование и строительство подземной части нового здания (второй сцены) Государственного академического Мариинского театра : Сб. науч.-техн. ст. / под ред. В. А. Ильичева, А. П. Ледяева, Р. А. Мангушева. СПб : СПбГАСУ, 2011. 192 с.
7. Рекомендации по устройству фундаментов способом опускного колодца / НИИОСП им. Н. М. Герсеванова. М. : Стройиздат, 1988. 29 с.
8. Руководство по проектированию опускных колодцев, погружаемых в тиксотропной рубашке / Харьковский ПромстройНИИпроект. М. : Строиздат, 1979. 128 с.

REFERENCES

1. *Osnovaniya, fundamenty i podzemnye sooruzheniya* [The bases, foundations and underground structures] / pod obshch. red. V. A. Il'icheva, R. A. Mangusheva. Moscow, ASV Publ., 2014. 728 p. (In Russian).
2. Fedotov V. A., Almazov A. N., Shashkov V. A., et al. The study of technology immersion and the stress-strain state sunk well with a diameter of 66 m, a depth of 68 m in the construction in soil conditions of Leningrad. *Sbornik nauchnykh trudov «Tekhnologiya i oborudovanie dlya spetsial'nykh stroitel'nykh rabot»* [Technology and equipment for special construction works]. Leningrad, VNIIGS Publ., 1983. Pp. 38–45. (In Russian).
3. Almazov A. N., Perminov N. A., Ol'shevskiy G. F., Feoktistova N. V. Ways to reduce friction forces at the dip of sunk wells. *Sbornik nauchnykh trudov «Tekhnologiya i oborudovanie dlya spetsial'nykh stroitel'nykh rabot»* [Technology and equipment for special construction works]. Leningrad, VNIIGS Publ., 1982. Pp. 109–116. (In Russian).
4. Shashkin K. G., Maslak T. V. Geotechnical analysis of an emergency situation during installing a sunk well into soft soils. *Sbornik trudov konf. «Aktual'nye voprosy geotekhniki pri reshenii slozhnykh zadach novogo stroitel'stva i rekonstruktsii»* [Current issues of geotechnical engineering in solving complex challenges of new construction and reconstruction]. St. Petersburg, SpbGASU Publ., 2010. Pp.138–143. (In Russian).
5. Perley E. M., Rayuk V. F., Belen'kaya V. V., Almazov A. N. *Svaynye fundamenty i zaglublennye sooruzheniya pri rekonstruktsii deystvuyushchikh predpriyatiy* [Pile foundations and buried structures in the reconstruction of existing enterprises]. Leningrad, Stroyizdat Publ. (Leningr. otd-nie), 1989. 176 p. (In Russian).
6. *Proektirovanie i stroitel'stvo podzemnoy chasti novogo zdaniya (vtoroy stseny) Gosudarstvennogo akademicheskogo Mariinskogo teatra* [The design and construction of the underground part of the new building (second stage) State academic Mariinsky theatre]. Sbornik nauch.-tekhn. statey / pod red. V. A. Il'icheva, A. P. Ledyaeva, R. A. Mangusheva. St. Petersburg, SpbGASU Publ., 2011. 192 p. (In Russian).
7. *Rekomendatsii po ustroystvu fundamentov sposobom opusknogo kolodtsa* [Recommendations for foundations way sunk well]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1988. 29 p. (In Russian).
8. *Rukovodstvo po proektirovaniyu opusknykh kolodtsev, pogruzhaemykh v tiksotropnoy rubashke* [Design guide sunk wells, is immersed in thixotropic shirt]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1979.128 p. (In Russian).

Для цитирования: *Ананьев А. А.* Особенности проектирования опускных колодцев в грунтовых условиях Санкт-Петербурга // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 5. С. 55–61.

For citation: Ananiev A. A. Features of design of a sunk well under the soil conditions of St. Petersburg. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2016, no. 5, pp. 55–61. (In Russian).