

УДК 624.15

РАСЧЕТ ВОДОНАСЫЩЕННОГО ОСНОВАНИЯ ПОД СООРУЖЕНИЯМИ НЕФТЕГАЗОПРОМЫСЛОВ CALCULATION OF WATER SATURATED FOUNDATION UNDER THE OIL-AND GAS FIELDS FACILITIES

Т. В. Мальцева, Т. В. Салтанова, А. Н. Краев, В. В. Миронов

T. V. Maltseva, T. V. Saltanova, A. N. Kraev, V. V. Mironov

*Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень,
Тюменский государственный университет, г. Тюмень*

*Ключевые слова: водонасыщенное основание; возведение сооружений на слабых грунтах;
математическая модель водонасыщенного основания; модифицированный метод конечных элементов
для расчета водонасыщенного основания*

*Key words: water saturated foundation; construction of facilities on weak grounds; mathematical model;
modified finite-element method for calculation of a water saturated foundation*

Для обустройства крупных нефтяных или газовых месторождений необходимы прокладка магистральных трубопроводов, строительство железной дороги, резервуаров для накопления нефтепродуктов, жилых домов и др. В условиях Западной Сибири отсыпка или намыв грунта под кусты, дороги, площадки для будущих объектов происходит в сложных геолого-климатических условиях. Одной из причин аварийных ситуаций при эксплуатации различных объектов является недостаточная проработка надежной его работы на этапе проектирования.

Влияние объектов нефтегазопромыслов на основание из водонасыщенного грунта исследуется с позиций воздействия внешних сил (от сооружения) на основание. Разработанная математическая модель напряженно-деформированного состояния основания позволяет определить максимальные нагрузки, возникающие в результате воздействия сооружения, и деформации, возникающие в основании.

Разработано и внедрено много способов увеличения несущей способности грунтового основания [1–5].

Расчет водонасыщенного основания осуществляется в рамках математической теории водонасыщенного грунта с учетом влияния остаточных избыточных поровых давлений в стабилизированном состоянии, когда временной фактор отсутствует [6].

В работе [7] рассматривалась пространственная задача о воздействии на водонасыщенное основание криволинейного участка трубопровода. Напряжения, связанные с криволинейностью оси трубопровода, как показывают расчеты, могут превышать напряжения, создаваемые весом трубы и перекачиваемого продукта. Поэтому вводилась горизонтальная сила q_2 — давление криволинейного участка трубопровода на грунт, определенная с учетом действия продольной (вдоль длины трубопровода) силы q_3 .

Математическая модель вертикального слоя водонасыщенного грунта конечной высоты (h) с учетом избыточных остаточных поровых давлений в стабилизированном состоянии представляет систему дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами G, λ, b, c относительно вектора перемещений $\mathbf{u} = (u_1, u_2)$ минеральных частиц грунта [8]:

$$-\left[\left(G+\lambda\right)\frac{\partial \theta}{\partial x_i}+G \Delta u_i+b \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i^2}+c \frac{\partial u_i}{\partial x_i}\right]=F_i, \quad i=1,2, \quad (1)$$

$$G=\frac{E_s}{2(1+\nu)}, \quad \lambda=\frac{E_s \nu}{(1+\nu)(1-2 \nu)}, \quad b=\frac{E_l}{\kappa^2}, \quad c=\frac{E_l}{\kappa h}, \quad \theta=\operatorname{div} \mathbf{u},$$

где E_s — модуль деформации, ν — коэффициент Пуассона минеральных частиц грунта, E_l — механическая постоянная поровой воды, κ — безразмерная величина ($0 < \kappa < 1$), определяемая из эксперимента [9, 10], h — высота сжимаемой толщи.

Граничные условия на части границы S_1 — кинематические, на части S_2 — статические:

$$\mathbf{u}|_{S_1}=0, \quad \boldsymbol{\sigma}|_{S_2}=\mathbf{q}(x_1, x_2), \quad (2)$$

где $\boldsymbol{\sigma}$ — тензор напряжений в минеральной частице грунта, в котором в диагональных элементах учитывается влияние поровой воды.

На дневной ($x_1 = 0$) поверхности тела S_2 за счет дренирующего покрытия избыточные остаточные поровые давления обращаются в ноль, и остаются только напряжения в минеральной частице грунта. Нагрузка $\mathbf{q}(x_1, x_2)$ — равнодействующая сил: q_1 — вес единицы длины возводимого сооружения; горизонтальная сила q_2 (при наличии).

Для решения системы уравнений (1) используется модифицированный метод конечных элементов. В качестве конечных элементов были взяты треугольные конечные элементы [8]. Внутри треугольного элемента перемещения описываются линейными зависимостями через узловые перемещения $\mathbf{u}=(u_1, u_2)$:

$$u_k=\frac{1}{2 \Delta}\left[\left(p_i+d_i x_1+n_i x_2\right) u_k^i+\left(p_j+d_j x_1+n_j x_2\right) u_k^j+\left(p_m+d_m x_1+n_m x_2\right) u_k^m\right] \\ p_i=x_1^j x_2^m-x_1^m x_2^j, \quad n_i=x_1^m-x_2^j, \quad d_i=x_2^j-x_2^m, \quad k=1,2.$$

Узловые перемещения u_k^i, u_k^j, u_k^m являются искомыми величинами.

Система линейных алгебраических уравнений метода конечных элементов для нахождения искоемых узловых перемещений $\{\delta\}=\left(u_1^i, u_2^i, u_1^j, u_2^j, u_1^m, u_2^m\right)$ [8,11] представлена в виде

$$([k_1]+[k_2])\{\delta\}=\{F\},$$

содержит дополнительное слагаемое в виде матрицы $[k_2]$, которая учитывает влияние поровой воды.

Приведем численное решение задачи при значениях горизонтальной силы интенсивностью $q_2 = 0,005 \text{ МН/м}$ и вертикальной — $q_1 = 0,0015 \text{ МН/м}$ (рис. 1).

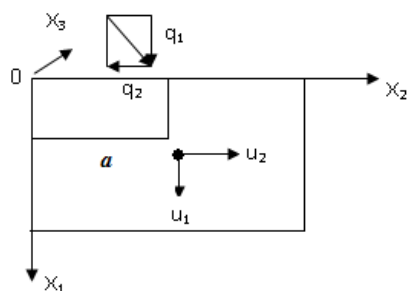


Рис. 1. Силы, действующие на водонасыщенное основание

Механические характеристики грунта $E_s = 5,2$ МПа, $E_l = 3,27$ МПа, $\nu = 0,3$, $\mu = 0,52$. На рис. 2 показан график горизонтальных перемещений частиц скелета грунта при $x_1 = 0$ м, $x_2 = 1$ м.

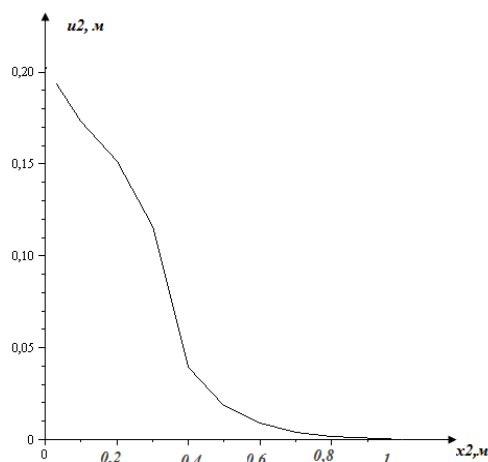


Рис. 2. Горизонтальные перемещения частиц скелета грунта

На рис. 3 представлены графики вертикальных перемещений для $x_2 = 0$, на расстоянии $x_2 = 0,3$ м и $x_2 = 0,9$ м от оси x_1 . Максимальные горизонтальные перемещения составили 0,2 м, минимальные — 0,03 м.

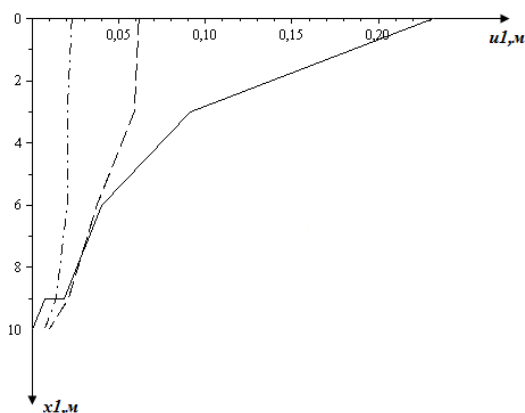


Рис. 3. Вертикальные перемещения для различных сечений

Метод решения позволяет решать задачу определения продольных и поперечных сил взаимодействия сооружения с грунтом. Предложенные модель и алгоритм решения позволяют провести расчет и в нем учесть возможность влияния поровой воды на напряженно-деформированное состояние основания. Также при решении задачи определена максимальная нагрузка сооружения на грунт, которая составила $q = 0,0166$ МН/м.

Полученные результаты исследований могут быть использованы при проектировании и расчете осадок инженерных объектов, возводимых на слабых основаниях. Реше-

ние задачи о напряженно-деформированном состоянии слабого основания позволит спрогнозировать предельно допустимые значения деформаций основания и на этапе проектирования учесть и принять меры по повышению безопасности его строительства и эксплуатации.

Список литературы

1. Maltseva T., Nabokov A., Chernykh A. Reinforced Sandy Piles for Low-Rise Buildings. *Procedia Engineering* V.117. 2015. pp. 239-245.
2. Краев А. Н. Повышение несущей способности водонасыщенного глинистого основания за счет внедрения песчаных армированных свай // Вестник Томского архитектурно-строительного университета. – 2008. – № 4. – С. 146-151.
3. Бай В. Ф., Мальцева Т. В., Краев А. Н. Методика расчета слабого глинистого основания, усиленного песчаной армированной по контуру подушкой с криволинейной подошвой // Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. – № 5. – С. 108-111.
4. Бай В. Ф., Краев А. Н. Исследование работы песчаной армированной по контуру подушки с криволинейной подошвой в условиях слабых глинистых грунтов. // Вестник гражданских инженеров. – 2014. – № 3. – С.107-110.
5. Мальцев Л. Е., Мальцева Т. В., Минаева А. В., Набоков А. В. Определение перемещений армирующего элемента песчаного цилиндра. // Научно-технический вестник Поволжья. – 2012. – № 2. – С. 234-238.
6. Мальцева Т. В. Математическая теория водонасыщенного грунта. – Тюмень: «Вектор Бук», 2012. – 240 с.
7. Мальцева Т. В., Дорофеев С. М., Салтанова Т. В. Исследование воздействия криволинейного участка трубопровода на водонасыщенное основание // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2012. – № 1. – С. 59-63.
8. Мальцев Л. Е., Мальцева Т. В., Салтанова Т. В. Анализ обобщенного оператора Ламе и отвечающий оператору конечный элемент // Проблемы прочности и пластичности. – 2006. – № 68. – С. 181-189.
9. Бай В. Ф., Мальцев Л. Е., Мальцева Т. В., Набоков А. В., Демин В. А. Экспериментальная установка для испытания грунта методом одноосного сжатия. Патент на изобретение RUS 2213952 20.03.2002.
10. Мальцев Л. Е., Мальцева Т. В., Демин В. А. Экспериментальное определение параметров кинематической модели для водонасыщенного образца грунта // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2001. – № 2. – С. 96-102.
11. Мальцева Т. В., Салтанова Т. В. Сопоставление матриц жесткости при расчете двухфазной полуплоскости // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2007. – № 5. – С. 49-56.

Сведения об авторе

Мальцева Татьяна Владимировна, д. ф.-м. н., профессор, заместитель проректора по науке, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, e-mail: maltseva_tv@tgasu.ru

Салтанова Татьяна Владимировна, к. ф. - м. н., доцент кафедры математики и информатики, Тюменский государственный университет, г. Тюмень, e-mail: tsaltanova@mail.ru

Краев Алексей Николаевич, к. т. н., доцент, заведующий лабораторией инженерного мерзлотоведения, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, e-mail: kraev_aln@mail.ru

Миронов Виктор Владимирович, д. т. н., профессор, академик РАН, заслуженный изобретатель РФ, профессор кафедры «Водоснабжение и водоотведение», Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, тел. 8(3452)434535, e-mail: vvmironov@list.ru

Information about the authors

Maltseva T. V., Doctor of Physics and Mathematics, professor, deputy head of the vice-chancellor for science of Industrial University of Tyumen, e-mail: maltseva_tv@tgasu.ru

Saltanova T. V., Candidate of Science in Physics and Mathematics, associate professor of the chair of mathematics and informatics, Tyumen State University of, e-mail: tsaltanova@mail.ru

Kraev A. V., Candidate of Science in Engineering, associate professor, head of the laboratory of engineering permafrost study, Industrial University of Tyumen, e-mail: kraev_aln@mail.ru

Mironov V. V., Doctor of Engineering, professor, academician of RANS, Honored Inventor of RF, professor of the chair «Water supply and disposal», Industrial University of Tyumen, phone: 8(3452)434535, e-mail: vvmironov@list.ru