

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 539.3

DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-2-160-168

Оригинальная статья /Original Paper

Моделирование влажностных напряжений в грунтовом полупространстве

Э.К. Агаханов¹, С.А. Агаханов², Г.Э. Агаханов¹

¹Дагестанский государственный технический университет,

¹367026, г. Махачкала, пр. И.Шамиля, 70, Россия,

²Дагестанский государственный педагогический университет,

²367003, г. Махачкала, пр. Ярагского, 57, Россия

Резюме. Цель. Решение вопросов надежности, долговечности и экономичности зданий и сооружений неразрывно связано с поведением грунтов в их основаниях. В работе для установления более реального поведения грунтов рассмотрено определение их напряженно-деформированного состояния с учетом новых факторов, в том числе физических воздействий, в частности влажности. **Метод.** Представляя структуру грунта в виде модели, составленной из двух упругих и одного вязкого элемента, и полагая, что свойства упругих элементов при изменении влажности не меняются, выполнено математическое моделирование влажностных напряжений в грунтовом полупространстве. Целесообразность данной модели объясняется тем, что переход к чрезмерно усложненным схемам строения материала вносит мало существенных поправок в законы деформирования и приводит к серьезным трудностям расчета. **Результат.** Замена истинного времени условным временем приводит к значительному упрощению решения уравнения, так как сводит одну его часть к дифференциальному линейному оператору с постоянными коэффициентами. Противоположная часть при этом обычно может рассматриваться как заданная функция условного времени. Получено максимальное значение напряжений при полном увлажнении грунта, очень малой интенсивности увлажнения и очень интенсивном увлажнении. **Вывод.** Задаваясь соответствующей интенсивностью увлажнения, можно получить максимальное напряжение, не превосходящее заданного допускаемого значения.

Ключевые слова: математическое моделирование; грунтовое полупространство; увлажнение грунта; влажностное набухание грунта; вынужденные влажностные деформации; влажностные напряжения

Для цитирования: Э.К. Агаханов, С.А. Агаханов, Г.Э. Агаханов. Моделирование влажностных напряжений в грунтовом полупространстве. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(2): 160-168. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-2-160-168

Modeling of humidity stresses in a soil half-space
E.K. Agakhanov¹, S.A. Agakhanov², G.E. Agakhanov¹

¹Daghestan State Technical University,

¹70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia

²Daghestan State Pedagogical University,

²57 Yaragskogo Ave., Makhachkala 367003, Russia

Abstract. Objective. Solving the issues of reliability, durability and efficiency of buildings and structures is inextricably linked with the behavior of soils in their foundations. In order to establish a more realistic behavior of soils, the paper considers the determination of their stress-strain state, taking into account new factors, including physical influences, in particular, humidity. **Method.** Representing the structure of the soil in the form of a model composed of two elastic and one viscous elements, and assuming that the properties of the elastic elements do not change

with changes in humidity, mathematical modeling of moisture stresses in the soil half-space was performed. The expediency of this model is explained by the fact that the transition to overly complicated material structure schemes introduces few significant corrections into the deformation laws and leads to serious calculation difficulties. **Result.** Replacing true time with conditional time leads to a significant simplification of the solution of the equation, since it reduces one part of it to a differential linear operator with constant coefficients. In this case, the opposite part can usually be considered as a given function of conditional time. The maximum value of stresses was obtained at full soil moisture, very low moisture intensity and very intensive moisture. **Conclusion.** By setting the appropriate moisture intensity, you can get the maximum stress that does not exceed the specified allowable value.

Keywords: mathematical modeling; ground half-space; soil moisture; moisture swelling of the soil; forced humidity deformations; moisture stress.

For citation: E.K. Agakhanov, C.A. Agakhanov, G.E. Agakhanov. Modeling of humidity stresses in a soil half-space. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Science. 2023; 50(2): 160-168. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-2-160-168

Введение. Решение актуальных сегодня вопросов надежности, долговечности и экономичности зданий и сооружений неразрывно связано с поведением грунтов в их основаниях [1-3]. Для установления более реального поведения грунтов требуется определение их напряженно-деформированного состояния с учетом новых факторов, в том числе физических воздействий, в частности влажности [4]. Влажностью грунта называют отношение массы воды к массе высушенного грунта (или к массе твердых частиц), выраженное в долях единицы, иногда в процентах. Особенностью влажности является то, что она может являться как причиной изменения свойств грунтов, так и причиной вынужденных деформаций. Примером являются глинистые грунты с большим содержанием гидрофильных глинистых минералов, которым свойственна способность изменять свой объем при изменении влажности. Увлажнение грунта приводит к увеличению его объема (набухание), а высыхание – к уменьшению его объемных деформаций (усадка).

Причиной увлажнения может быть повышение уровня подземных вод, накопление дополнительной влаги под сооружением из-за нарушения природных условий испарения воды из грунта при экранировании его поверхности построением сооружения т.д. Уменьшение влажности грунта обычно связано с технологическими или климатическими факторами [5].

Если набухание грунта происходит в стесненных условиях, то в нем возникают напряжения, определение которых является предметом данной статьи. Высокие градиенты влажности могут привести к высоким концентрациям напряжений. При сильном набухании может произойти вспучивание грунтов на поверхности, что часто сопровождается повреждением дорожного полотна, подземных коммуникаций, а также фундаментов, что может привести к обрушению зданий и сооружений.

Задачи теории упругости, в которых вынужденные влажностные деформации вносят существенный вклад в результаты решения, аналогично решению задач теории упругости для тел, находящихся в температурном поле, для которых существуют устоявшийся термин термоупругость, относятся к классу задач влагоупругости.

В работах [6-9] представлены решения стационарных и нестационарных одномерных, двумерных задач о влажностном набухании цилиндрического глинистого массива с отверстием и полого сферического массива.

Грунты, особенно при увлажнении, не обладают большой стабильностью деформаций под нагрузкой и при современных требованиях к точности результатов расчета нельзя игнорировать ярко выраженное свойство грунтов деформироваться во времени, т. е. ползучестью.

Автором в работе [10] в рамках модели линейно-деформируемого сплошного изотропного тела выполнено математическое моделирование физических воздействий в грунтовых средах со свойствами ползучести. При этом уравнения ползучести будут иметь только одну

независимую переменную – время, так как вынужденные деформации можно считать заданной функцией времени. Очевидно, что инвариантная во времени среда, вынужденные деформации которой изменяются по заданному закону во времени, может рассматриваться как среда с переменными свойствами. Для среды с неизменяющимися свойствами все зависимости должны быть инвариантными во времени.

При этом характеристики среды, зависящие от двух переменных t и τ , превращаются в функции разности этих двух переменных $t - \tau$, а функции t превращаются в постоянные величины. В квазиупругой постановке получено решение для неограниченного грунтового массива с плоской поверхностью, находящегося под действием плоско - параллельного потока тепла.

Данное решение может быть использовано для расчета напряжений с учетом ползучести в грунтовом массиве от действия вынужденных деформаций, вызванных колебаниями температуры на его поверхности.

В работе [11] автором для водонасыщенной двухфазной грунтовой среды с изменяющимися во времени свойствами в рамках сплошного изотропного тела с линейно-наследственной ползучестью выполнено математическое моделирование воздействия порового давления на грунт. Разработана новая расчетная модель, в которой поровое давление на грунт рассматривается как воздействие вынужденных деформаций.

Показано, что разработанная и известная расчетные модели (в известной модели поровое давление на грунт рассматривается как действие объемных сил) полностью согласуются с установленными ранее в механике деформируемого твердого тела общими условиями эквивалентности воздействий [12-14]. Рассмотрена водонасыщенная двухфазная грунтовая система, находящаяся под действием поверхностных сил. Процесс консолидации грунта сопровождается возникновением сил взаимодействия между двумя фазами грунта (грунтовым скелетом и поровой водой), обусловливаемых явлениями взвешивания скелета грунта за счет возникших давлений в поровой жидкости.

Постановка задачи. Глинистые грунты имеют широкое распространение в основаниях зданий и сооружений. Поэтому определение влажностных напряжений в грунтовом полупространстве является актуальным.

Рассмотрим грунтовое полупространство, подвергшее увлажнению в силу определенных причин, с изменением влажности во времени по закону

$$W = W_{\max}(1 - e^{-vt}), \quad (1)$$

где: $W_{\max}$ - полная влагоемкость грунта;

v - коэффициент, характеризующий интенсивность увлажнения.

Учитывая, что массив грунта бесконечен в направлениях горизонтальных осей Ox и Oy , следует положить деформации $\varepsilon_x = \varepsilon_y = 0$, иначе суммарное увеличение размеров массива было бы также бесконечным. В силу равнозначности направлений Ox и Oy напряжения $\sigma_x = \sigma_y$. Кроме того, плоская поверхность $z = 0$ совершенна свободна, поэтому напряжения $\sigma_z = 0$, а деформации $\varepsilon_z = \beta W$, где β - коэффициент разбухания грунта [15].

Методы исследования. Представляя структуру грунта в виде модели, составленной из двух упругих и одного вязкого элемента, и полагая, что свойства упругих элементов при изменении влажности не меняются, основное упрощенное дифференциальное уравнение линейного деформирования имеет вид [16, 17]:

$$En(t) \frac{d\varepsilon}{dt} + H\varepsilon = \sigma + n(t) \frac{d\sigma}{dt}, \quad (2)$$

где: E - мгновенный модуль упругости;

H - длительный модуль упругости;

n - время релаксации.

Целесообразность данной модели объясняется тем, что переход к чрезмерно

усложненным схемам строения материала вносит мало существенных поправок в законы деформирования и приводит к серьезным трудностям расчета.

При очень медленных процессах деформирования в уравнении (2) скоростями напряжений и деформаций можно пренебречь по сравнению с величинами напряжений и деформаций, и тогда мы приходим к обычному закону Гука с длительным модулем упругости.

При очень быстрых процессах деформирования, наоборот, скорости деформаций и напряжений очень велики, и по сравнению с ними можно пренебречь самими деформациями и напряжениями. При этом снова получается закон Гука, но продифференцированный по времени и с мгновенным модулем упругости.

Рассмотрен случай постоянства мгновенного и длительного модулей упругости и переменного времени релаксации.

Введем шкалу условного времени по формулам [18]:

$$d\xi = \frac{dt}{n(t)}; \quad \xi = \int_0^t \frac{dt}{n(t)}. \quad (3)$$

При этом уравнение (2) преобразуется в

$$E \frac{d\varepsilon}{d\xi} + H\varepsilon = \sigma + \frac{d\sigma}{d\xi}. \quad (4)$$

Замена истинного времени условным временем приводит к значительному упрощению решения уравнения (2), так как сводит одну его часть к дифференциальному линейному оператору с постоянными коэффициентами [19].

Противоположная часть при этом обычно может рассматриваться как заданная функция условного времени.

Здесь ε представляет собой не полную деформацию, а лишь ту ее часть, которая остается после вычета деформации разбухания ε_δ , являющейся функцией влажности W .

Примем зависимость масштаба условного времени ξ от влажности W по следующей простой формуле:

$$\frac{d\xi}{dt} = \frac{W - W_{\max}}{n_0}, \quad (5)$$

где n_0 - постоянный коэффициент, физический смысл которого выяснится ниже.

Учитывая (3) и (5), найдем, что время релаксации равно:

$$n = \frac{n_0}{W - W_{\max}}, \quad (6)$$

и вместо (2) можно написать

$$\frac{En_0}{W - W_{\max}} \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} + H\varepsilon = \sigma + \frac{n_0}{W - W_{\max}} \cdot \frac{d\sigma}{dt}. \quad (7)$$

Отсюда видно, что n_0 представляет собой время релаксации влагонасыщенной грунтовой среды 100%-ной влажности.

При меньшей влажности время релаксации становится больше и в абсолютно сухой грунтовой среде обращается в бесконечность.

Из (5) получаем выражение условного времени

$$\xi = \frac{1}{n_0} \int_0^t (W - W_{\max}) dt = \frac{1}{n_0} \int_0^t [W_{\max}(1 - e^{-vt}) - W_{\max}] dt = \frac{W_{\max}}{n_0 v} (e^{-vt} - 1). \quad (8)$$

Деформацию разбухания можно в первом приближении считать пропорциональной влажности

$$\varepsilon_e = \beta W. \quad (9)$$

Влажностная деформация изменяется во времени, согласно формулам (1) и (9)

$$\varepsilon_e = \beta W_{\max}(1 - e^{-vt}). \quad (10)$$

В начале увлажнения $\varepsilon_e^0 = 0$. Увеличение влажностной деформации

$$\Delta \varepsilon_e = \beta W_{\max}(1 - e^{-vt}) \quad (11)$$

должно компенсироваться деформациями сжатия, связанных с напряжениями зависимостью (7).

Таким образом, получаем

$$\varepsilon = \beta W_{\max}(1 - e^{-vt}). \quad (12)$$

Используя выражение (8), получим вместо (12)

$$\varepsilon = -\beta n_0 v \xi. \quad (13)$$

Подставив это значение ε в уравнение (4), будем иметь:

$$-E\beta n_0 v - H\beta n_0 v \xi = \sigma + \frac{d\sigma}{d\xi}. \quad (14)$$

Это уравнение легко решается относительно σ [20]. При начальном условии

$$\sigma(0) = 0 \quad (15)$$

имеем решение

$$\sigma = -\beta n_0 v [(E - H)(1 - e^{-\xi}) + H\xi]. \quad (16)$$

Заменяя условное время ξ через истинное время t по формуле (8), получаем окончательно

$$\sigma = \beta n_0 v (E - H) \left(e^{\frac{W_{\max}(1 - e^{-vt})}{n_0 v}} - 1 \right) + \beta H W_{\max}(1 - e^{-vt}). \quad (17)$$

Обсуждение результатов. Полученное решение (17) для напряжений дает возможность для любого промежутка времени определить влажностные напряжения в грунтовом полупространстве.

Для выполнения расчетов при различных значениях исходных данных по полученному аналитическому решению составлена программа в пакете MatLab с использованием встроенного языка программирования системы Matlab.

Численный счет был выполнен при следующих значениях исходных данных:

$V = 0.3$ - полная влагоемкость грунта;

$V = 0.005; 0.006; 0.008; 0.01; 0.02; 0.03; 0.04; 0.05; 0.1; 1$ - время релаксации влагонасыщенной грунтовой среды 100%-ной влажности;

$v = 0; 5; 10; 15; 25; 30; 35; 40; 45; 50$ - коэффициент, характеризующий интенсивность увлажнения;

$\beta = 1.15$ - коэффициент разбухания грунта;

$H = 2 \cdot 10^8$ - мгновенный модуль упругости;

$H = 2 \cdot 10^9$ - длительный модуль упругости.

По полученным данным составлены таблицы 1, 2 и 3 и построены графики изменения влажностных напряжений и распределения влажностных деформаций в грунтовом полупространстве (рис.1 и 2).

Таблица 1. Зависимость деформации ε_z от времени и интенсивности увлажнения
Table 1. Dependence of deformation ε_z on time and moisture intensity

ν t	5	10	15	20	25	30	35	40	45
0.02	0.033	0.063	0.089	0.114	0.136	0.156	0.174	0.190	0.205
0.04	0.063	0.114	0.156	0.190	0.218	0.241	0.260	0.275	0.288
0.06	0.089	0.156	0.205	0.241	0.268	0.288	0.303	0.314	0.322
0.08	0.114	0.190	0.241	0.275	0.298	0.314	0.324	0.331	0.336
0.1	0.136	0.218	0.268	0.298	0.317	0.328	0.335	0.339	0.341
0.12	0.156	0.241	0.288	0.314	0.328	0.336	0.340	0.342	0.343
0.14	0.174	0.260	0.303	0.324	0.335	0.340	0.342	0.344	0.344
0.16	0.190	0.275	0.314	0.331	0.339	0.342	0.344	0.344	0.345
0.18	0.205	0.288	0.322	0.336	0.341	0.343	0.344	0.345	0.345
0.2	0.218	0.298	0.328	0.339	0.343	0.344	0.345	0.345	0.345

Таблица 2. Изменение напряжений (МПа) во времени при различных значениях времени релаксации (случай $\nu = 10$)
Table 2. Change in stresses (MPa) over time at different values of relaxation time (case $\nu=10$)

n_0 t	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0.01	8.48	16.40	20.80	22.71	23.45	23.73	23.83	23.87	23.89
0.02	5.89	9.08	10.47	11.02	11.23	11.30	11.33	11.34	11.34
0.03	5.35	7.85	8.86	9.25	9.39	9.44	9.46	9.47	9.47
0.04	5.13	7.36	8.24	8.57	8.69	8.74	8.75	8.76	8.76
0.05	5.00	7.10	7.91	8.22	8.33	8.37	8.39	8.39	8.39
0.1	4.78	6.64	7.35	7.61	7.70	7.74	7.75	7.76	7.76
1	4.60	6.30	6.93	7.16	7.24	7.27	7.29	7.29	7.29

Таблица 3. Изменение напряжений (МПа) во времени при различных значениях времени релаксации (случай $\nu = 20$)
Table 3. Change in stresses (MPa) over time at different values of relaxation time (case $\nu=20$)

n_0 t	0.03	0.06	0.09	0.12	0.15	0.18	0.21	0.24	0.27	0.3
0.005	4.84	10.28	15.08	18.56	20.80	22.14	22.92	23.35	23.60	23.73
0.006	4.46	8.78	12.22	14.58	16.05	16.92	17.41	17.69	17.84	17.92
0.008	4.07	7.38	9.72	11.22	12.11	12.63	12.92	13.08	13.17	13.22
0.01	3.87	6.73	8.63	9.79	10.47	10.86	11.08	11.20	11.27	11.30
0.02	3.54	5.75	7.06	7.81	8.24	8.47	8.60	8.68	8.72	8.74
0.03	3.44	5.49	6.67	7.34	7.71	7.92	8.03	8.09	8.13	8.15
0.04	3.39	5.37	6.50	7.13	7.48	7.67	7.78	7.84	7.87	7.89
0.05	3.37	5.31	6.40	7.01	7.35	7.53	7.64	7.69	7.72	7.74

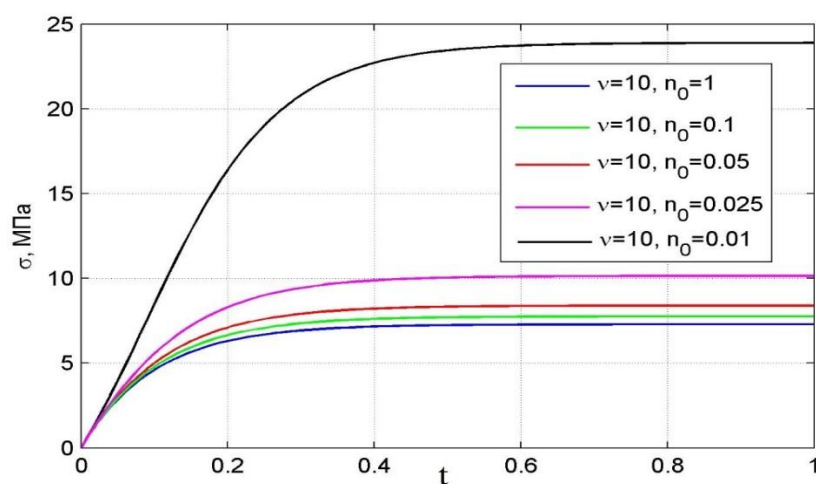


Рис. 1. Графики изменения влажностных напряжений

Fig. 1. Graphs of changes in moisture stresses

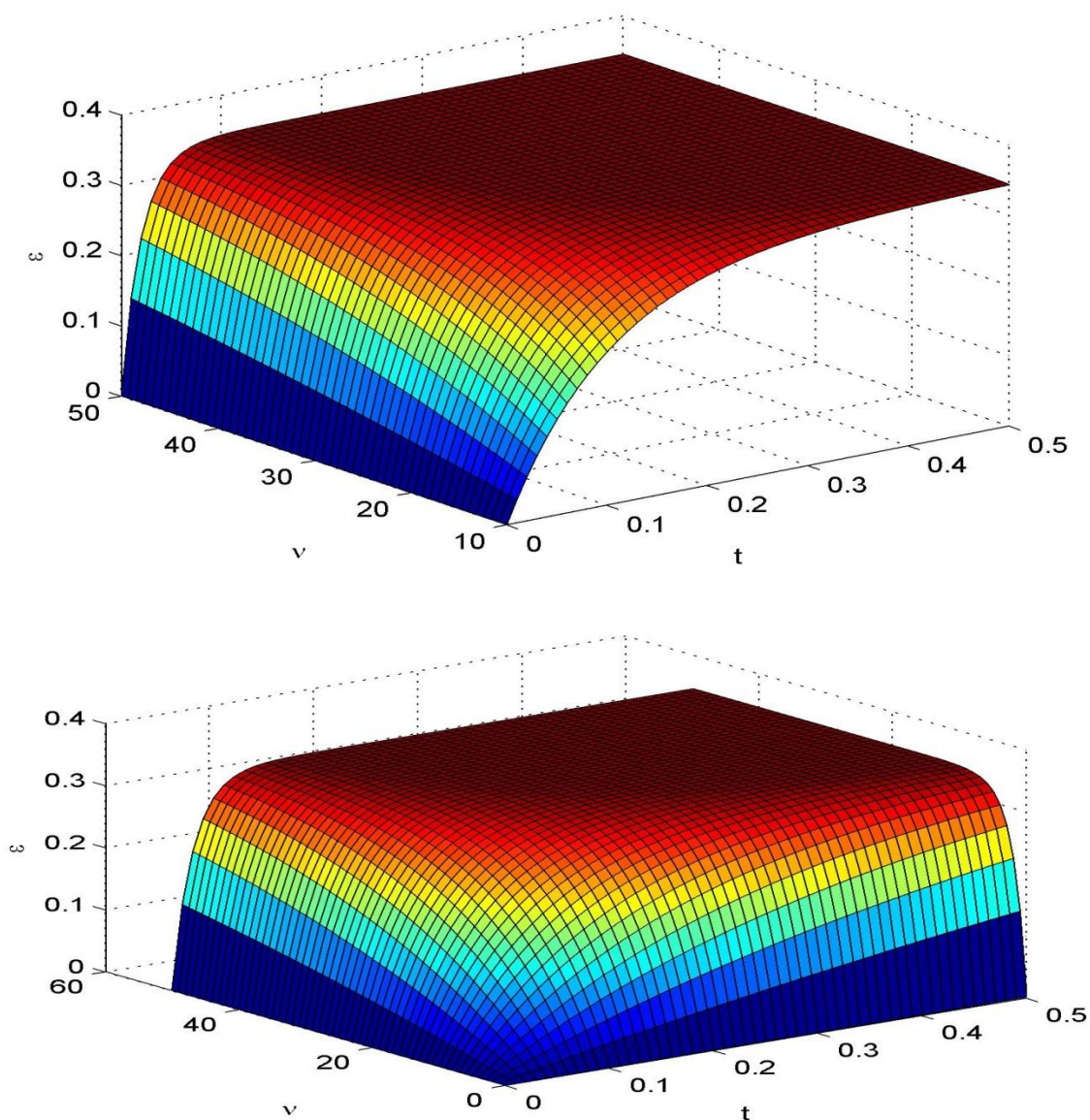


Рис. 2. Распределение влажностных деформаций

Fig. 2. Distribution of moisture deformations

Вывод. Максимальное значение σ приобретает при полном увлажнении грунта, когда $W = W_{\max}, t = \infty$.

$$\text{При этом } \xi = -\frac{W_{\max}}{n_0 v} \text{ и } \sigma = \sigma_{\max} = \beta n_0 v (E - H) \left(e^{\frac{W_{\max}}{n_0 v}} - 1 \right) + \beta H W_{\max}.$$

Если интенсивность увлажнения очень мала, то, полагая $v \rightarrow 0$, получим $\sigma_{\max} = \beta H W_{\max}$.

При очень интенсивном увлажнении $v \rightarrow \infty$ и $\sigma_{\max} = \beta E W_{\max}$.

Очевидно, что, задаваясь соответствующей интенсивностью увлажнения v , можно получить максимальное напряжение, не превосходящее заданного допускаемого значения, большего, чем $\beta H W_{\max}$.

Библиографический список:

1. Agakhanov E.K., Agakhanov M.K., Agakhanova R.E. Stress modelling in natural foundation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Ser. «International Scientific and Practical Conference Environmental Risks and Safety in Mechanical Engineering, ERSME 2020». - 2020. - С. 012072.
2. Агаханов Э.К., Агаханов М.К., Кравченко Г.М., Труфанова Е.В. Выбор оптимальной конструктивной модели высотного здания // Известия вузов. Строительство. 2022. № 11. С. 95-105. DOI: 10.32683/0536-1052-2022-767-11-95-105.
3. Э. К. Агаханов, Г. М. Кравченко, Е. В. Труфанова, М. К. Агаханов. Влияние способа моделирования свайного фундамента на напряженно-деформированное состояние каркаса здания сложной геометрической формы. - Системные технологии. - 2023. - № 1 (46). - С. 131-139.
4. Тер-Мартirosян З.Г., Нгуен Хуи Хиеп. Влияние степени водонасыщения глинистого грунта на его напряженно-деформированное состояние // Вестник МГСУ. 2012. № 8. С. 112-120.
5. Механика грунтов, основания и фундаменты: учеб. пособ. / С.Б. Ухов, В.В. Семенов, В.В. Знаменский, З.Г. Тер-Мартirosян, С.Н. Чернышев. М.: АСВ, 2007. 566 с.
6. Андреев В.И., Аверсьев А.С. Стационарная задача влагуупругости для неоднородного толстостенного цилиндра // Вестник МГСУ. 2012. № 10. С. 56-61.
7. Andreev V.I., Avershyev A.S. About Influence of Moisture on Stress State of Soil taking into account Inhomogeneity // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2013. Vol. 9. Iss. 3. pp. 14-20.
8. Андреев В.И., Аверсьев А.С. Влагуупругость неоднородного толстостенного полого шара при нестационарном влажностном режиме // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2014. № 1. С. 30-37.
9. Andreev V.I., Avershyev A.S. Two-dimensional Problem of Moisture Elasticity of Inhomogeneous Spherical Array with Cavity // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 580-583. pp. 812-815.
10. Агаханов Г.Э. О математическом моделировании физических воздействий в грунтах // Научное обозрение. 2014. № 12. С. 733-736.
11. Агаханов Г.Э. О математическом моделировании воздействия порового давления на грунт // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2015. № 1. С. 8-16.
12. Агаханов Э.К. О развитии комплексных методов решения задач механики деформируемого твердого тела // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2013. № 2. С. 39-45.
13. Агаханов Э.К., Агаханов М.К. О моделировании действия объемных сил в упругоползучем теле // Известия Вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2005. № 1. С. 25-26.
14. Agakhanov E.K., Agakhanov M.K. A complex approach to the solution of problems in mechanics of deformable rigid bodies // E3S Web of Conferences. 2018 International on Business Technologies for Sustainable Urban Development. SPbWOSCE 2018. 2019. С. 01071.
15. Сопротивление материалов с основами теории упругости и пластичности: учебник / Г.С. Варданян, В.И. Андреев, Н.М. Атаров, А.А. Горшков. М.: АСВ, 1995. 568 с.
16. Ржаницын А.Р. Теория ползучести. М.: Стройиздат, 1968. 418 с.
17. Самуль В.И. Основы теории упругости и пластичности, М., В.Ш., 1982.
18. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.-Л.: Гостехиздат, 1951. 660 с.
19. Сахарников Н.А. Высшая математика, ЛГУ, 1973.
20. Степанов В.В. Курс дифференциальных уравнений, Наука, 1966.

References:

1. Agakhanov E.K., Agakhanov M.K., Agakhanova R.E. Stress modelling in natural foundation. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Ser. «International Scientific and Practical Conference Environmental Risks and Safety in Mechanical Engineering, ERSME 2020». 2020; 012072.
2. Agakhanov E.K., Agakhanov M.K., Kravchenko G.M., Trufanova E.V. The choice of the optimal constructive model of a high-rise building. *Izvestiya vuzov. Construction*. 2022; 11:95-105. DOI: 10.32683/0536-1052-2022-767-11-95-105. (In Russ)
3. E. K. Agakhanov, G. M. Kravchenko, E. V. Trufanova, and M. K. Agakhanov. The influence of the method of modeling a pile foundation on the stress-strain state of the frame of a complex geometric building. - *System technologies*. 2023; 1 (46): 131-139. (In Russ)
4. Ter-Martirosyan Z.G., Nguyen Huy Hiep. Influence of the degree of water saturation of clay soil on its stress-strain state. *Vestnik MGSU*. 2012; 8:112-120. (In Russ)
5. Soil mechanics, bases and foundations: textbook. Allowance. S.B. Ukhov, V.V. Semenov, V.V. Znamensky, Z.G. Ter-Martirosyan, S.N. Chernyshev. M.: ASV, 2007; 566. (In Russ)
6. Andreev V.I., Avershiev A.S. Stationary problem of moisture elasticity for an inhomogeneous thick-walled cylinder. *Vestnik MGSU*. 2012; 10:56-61. (In Russ)
7. Andreev V.I., Avershyev A.S. About Influence of Moisture on Stress State of Soil taking into account Inhomogeneity. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2013; 9(3):14-20.
8. Andreev V.I., Avershiev A.S. Moisture elasticity of an inhomogeneous thick-walled hollow ball under non-stationary humidity conditions. *Structural mechanics of engineering structures and structures*. 2014; 1:30-37. (In Russ)
9. Andreev V.I., Avershyev A.S. Two-dimensional Problem of Moisture Elasticity of Inhomogeneous Spherical Array with Cavity. *Applied Mechanics and Materials*. 2014; 580-583: 812-815.
10. Agakhanov G.E. On mathematical modeling of physical impacts in soils. *Scientific Review*. 2014; 12: 733-736. (In Russ)
11. Agakhanov G.E. On mathematical modeling of the impact of pore pressure on soil. *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2015; 1: 8-16. (In Russ)
12. Agakhanov E.K. On the development of complex methods for solving problems of the mechanics of a deformable solid body *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2013; 2:39-45. (In Russ)
13. Agakhanov E.K., Agakhanov M.K. On modeling the action of body forces in an elastic creeping body. *Izvestiya Vuzov. North Caucasian region. Technical science*. 2005; 1: 25-26. (In Russ)
14. Agakhanov E.K., Agakhanov M.K. A complex approach to the solution of problems in mechanics of deformable rigid bodies. *E3S Web of Conferences*. 2018 International on Business Technologies for Sustainable Urban Development. SPbWOSCE 2018. 2019; 01071.
15. Resistance of materials with the basics of the theory of elasticity and plasticity: textbook / G.S. Vardanyan, V.I. Andreev, N.M. Atarov, A.A. Gorshkov. M.: ASV, 1995; 568. (In Russ)
16. Rzhantsyn A.R. Creep theory. M.: Stroyizdat, 1968; 418. (In Russ)
17. Samul V.I. Fundamentals of the theory of elasticity and plasticity, M., V.Sh., 1982. (In Russ)
18. Tikhonov A.N., Samarskii A.A. Equations of mathematical physics. M.-L.: Gostekhizdat, 1951; 660. (In Russ)
19. Sakharikov N.A. Higher Mathematics, Leningrad State University, 1973. (In Russ)
20. Stepanov V.V. Course of differential equations, Nauka, 1966. (In Russ)

Сведения об авторах:

Агаханов Элифхан Керимханович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Транспортные сооружения и строительные материалы», Elifhan@bk.ru

Агаханов Селимхан Агаханович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Информатика и вычислительная техника», Elifhan@bk.ru

Агаханов Гаджи Элифханович, кандидат технических наук, gadzhi92@bk.ru

Information about authors:

Elifkhan K. Agakhanov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Department of Transport Facilities and Building Materials, Elifhan@bk.ru

Selimkhan A. Agakhanov, Cand. Sci. (Physical and Mathematical), Assoc. Prof., Department of Informatics and Computer Engineering, Elifhan@bk.ru

Gadzhi E. Agakhanov, Cand. Sci. (Eng.), gadzhi92@bk.ru

Конфликт интересов/ Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 13.04.2023.

Одобрена после рецензирования Revised 16.05.2023.

Принята в печать/ Accepted for publication 16.05.2023.