



## Механические характеристики вязкоупругого водонасыщенного основания

Т. В. Крижанивская<sup>1</sup> ✉, В. В. Воронцов<sup>1</sup>, Б. А. Тайех<sup>2</sup>, Ф. С. Куличенко<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Тюменский индустриальный университет

Тюмень, ул. Володарского, 38, 625000, Российская Федерация

<sup>2</sup> Исламский университет Газы

Газа, ул. Гамалы Абдель Насера, Палестина

<sup>3</sup> Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы

Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6, 117198, Российская Федерация

✉ [krizhanivskajatv@tyuiu.ru](mailto:krizhanivskajatv@tyuiu.ru)



**Аннотация.** При проектировании зданий и сооружений на слабых водонасыщенных грунтах необходимо выполнять расчет напряженно-деформированного состояния основания с учетом ползучести. Это позволяет прогнозировать развитие деформаций во времени, перераспределять усилия, вызванные ползучестью, для повышения надежности и долговечности конструкций, а также помогает снизить риск возникновения аварийных ситуаций. В работе был выполнен расчет напряженно-деформированного состояния вязкоупругого основания по кинематической модели грунта в рамках линейной наследственной теории вязкоупругости. Экспериментальные графики изменения поровых давлений и осадки штампа были представлены как функции времени с помощью метода ломаных Л. Е. Мальцева. Все результаты проиллюстрированы графиками. Показана методика получения оригинала от известного изображения. Определены механические вязкоупругие характеристики по кинематической модели грунта. Используя полученные данные, в дальнейшем можно определить развитие осадки во времени для вязкоупругих водонасыщенных оснований.

**Ключевые слова:** водонасыщенное основание, механические вязкоупругие характеристики, вязкоупругие свойства грунта, функции изображения и оригинала, метод ломаных, ползучесть

**Для цитирования:** Крижанивская Т. В., Воронцов В. В., Тайех Б. А., Куличенко Ф. С. Механические характеристики вязкоупругого водонасыщенного основания. *Архитектура, строительство, транспорт*. 2025;5(4):74–85. <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-4-74-85> EDN: AEVHFT

## Mechanical characteristics of viscoelastic water-saturated foundation

Tatiana V. Krizhanivskaya<sup>1</sup> ✉, Viacheslav V. Vorontsov<sup>1</sup>, Bassam A. Tayeh<sup>2</sup>, Faina S. Kulichenko<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Industrial University of Tyumen

Tyumen, 38 Volodarskogo St., 625000, Russian Federation

<sup>2</sup> Islamic University of Gaza,

Gaza, Gamal Abdel Nasser St., Palestine

<sup>3</sup> Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba

Moscow, 6 Miklukho-Maklaya St., 117198, Russian Federation

✉ [krizhanivskajatv@tyuiu.ru](mailto:krizhanivskajatv@tyuiu.ru)



**Abstract.** When designing buildings and structures on soft water-saturated soils, it is necessary to calculate the stress-strain state of the foundation with creep. This allows us to predict the development of deformations over time, redistribute creep-induced forces to improve the reliability and durability of structures, and helps reduce the risk of emergencies. This study calculated the stress-strain state of a viscoelastic foundation using a kinematic soil model within the framework of the linear hereditary theory of viscoelasticity. Experimental graphs of pore pressure changes and stamp settlement were presented as time functions using broken-line method by L. E. Maltsev. All results are illustrated by graphs. A methodology for obtaining the original function from a transform is shown. Mechanical viscoelastic characteristics were determined according to the kinematic soil model. Using the obtained data, it is possible in the future to determine the development of settlement over time for viscoelastic water-saturated foundations.

**Keywords:** water-saturated foundation, mechanical viscoelastic characteristics, viscoelastic properties of soil, image and original functions, broken line method, creep

**For citation:** Krizhanivskaya T. V., Vorontsov V. V., Tayeh B. A., Kulichenko F. S. Mechanical characteristics of viscoelastic water-saturated foundation. *Architecture, Construction, Transport*. 2025;5(4):74–85. (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-4-74-85>



## 1. Введение / Introduction

Строительство гражданских, промышленных зданий и сооружений, объектов нефтегазодобывающего комплекса в Западной Сибири ведется в сложных инженерно-геологических условиях на толщах слабых, полностью водонасыщенных глинистых грунтов, на заболоченных и заторфованных территориях, где водосток практически отсутствует.

При проектировании новых инженерных объектов и обследовании существующих зданий и сооружений на слабых водонасыщенных грунтах одной из основных задач является определение изменения деформаций основания во времени для того, чтобы оценить и предотвратить возможное разрушение объектов, обеспечить надежность и долговечность зданий и сооружений. Решение этой задачи возможно только посредством методов математического моделирования ползучести.

Для описания изменения деформации во времени (ползучести) существует достаточно много моделей. В основу теории упругопластического упрочняющего тела, которая позволяет учесть пластические деформации до момента наступления предельного состояния, легли разработки D. C. Drucker, R. E. Gibson, D. Henkel [1]. Дальнейшее развитие эта теория получила в работах З. Г. Тер-Мартirosяна [2–4], В. Н. Широкова [5], А. С. Zhakulin [6], М. Ю. Абелева [7], А. Г. Шашкина [8], J. C. Liu [9], X.-M. Li [10] и других авторов.

Теория фильтрационной консолидации, которая описывает деформирование во времени полностью водонасыщенных грунтов, впервые была предложена К. Терцаги в 1925 г. и получила развитие в работах Н. М. Герсеванова (1931–1948 гг.), В. А. Флорина (1937–1961 гг.), Н. А. Цытовича (1940–1984 гг.), З. Г. Тер-Мартirosяна (1986–2022 гг.).

Следует отметить, что базовые нормативные документы по проектированию оснований и фундаментов (СП 22.13330<sup>1</sup>), в частности свай (СП 24.13330<sup>2</sup>), не предписывают обязательный рас-

<sup>1</sup> СП 22.13330.2016 Основания зданий и сооружений = Soil bases of buildings and structures. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83\*. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456054206> (дата обращения: 07.08.2025).

<sup>2</sup> СП 24.13330.2021 Свайные фундаменты = Pile foundations. URL: <https://docs.cntd.ru/document/728474148> (дата обращения: 07.08.2025).

чет прочности и деформаций основания фундаментов с учетом вязкоупругих свойств, однако в СП 267.1325800.2016<sup>3</sup> при проектировании высотных зданий требуется осуществлять прогноз осадок во времени на весь период эксплуатации объекта. Важно на данном этапе определить дальнейший путь обеспечения надежности зданий и сооружений: либо продолжить в основном блоке задач применять только коэффициенты надежности, игнорируя выполнение расчета осадок во времени, либо перейти к более трудоемкому, но надежному подходу – проведению расчетов осадок во времени с учетом фильтрационной и вторичной консолидации, реологических характеристик грунтов.

Согласно ГОСТ 26447-85<sup>4</sup>, для изучения реологических свойств грунтов проводится испытание образца ненарушенной структуры малой высоты в условиях одноосного сжатия. Вследствие этого двухфазный образец переходит в однофазный, так как поровая вода после конечного отрезка времени полностью сбрасывает с себя нагрузку. Однако результаты натурных и лабораторных экспериментов, в частности [11–13], показывают, что на удалении от уровня планировочной отметки земли поровая вода воспринимает значительную часть напряжений и после окончания процесса консолидации. В связи с этим целесообразно при расчете напряженно-деформированного состояния водонасыщенных оснований одновременно учитывать ползучесть скелета и сжимаемость поровой жидкости, что дает качественно новые результаты по сравнению с теорией Терцаги-Герсеванова, наиболее приближенные к экспериментальным данным.

Расчет любого объекта начинается с выбора определенной модели, основанной на тех или иных гипотезах или предположениях. В механике грунтов большинство моделей прогноза длительных осадок базируется на феноменологическом представлении о взаимодействии грунтового основания с фундаментом зданий и сооружений, насыпей автомобильных и железных дорог. С учетом того, что определение осадки на достаточно большом промежутке времени (месяцы, годы) является нелинейной задачей, применение вышеуказанного подхода требует дальнейшего совершенствования. Одним из направлений является исследование вязкоупругих механических характеристик грунта по кинематической модели Л. Е. Мальцева, Т. В. Мальцевой [14].

В качестве объекта исследования был принят образец из водонасыщенного суглинка; эксперимент с ним (проведен одним из авторов данного исследования и описан в работе [15]) был обработан для определения механических вязкоупругих характеристик грунта.

## 2. Материалы и методы / Materials and methods

Испытаниям подвергался крупногабаритный двухфазный образец размером  $1.25 \times 1.25$  м в плане высотой  $H = 1.0$  м. Образец был помещен в лоток с водонепроницаемыми стенками и дном. К загрузающему штампу было приложено рабочее давление  $\sigma_0 = 0.0046$  МПа.

Датчики для измерения поровых давлений и перемещений располагались в двух уровнях (рис. 1) на глубине  $z = 0.3$  м и  $z_1 = 0.6$  м от дневной поверхности.

Особенность эксперимента заключалась в следующем:

- над поверхностью образца был создан водяной замок высотой 3 см для поддержания влажности образца;

<sup>3</sup> СП 267.1325800.2016. Здания и комплексы высотные. Правила проектирования = High rise buildings and complexes. Design rules. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456044284> (дата обращения: 10.08.2025).

<sup>4</sup> ГОСТ 26447-85. Породы горные. Метод определения механических свойств глинистых пород при одноосном сжатии = Rocks. Method for determination of mechanical properties for unconfined compressive strength of clay rocks. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200023985> (дата обращения: 07.07.2025).

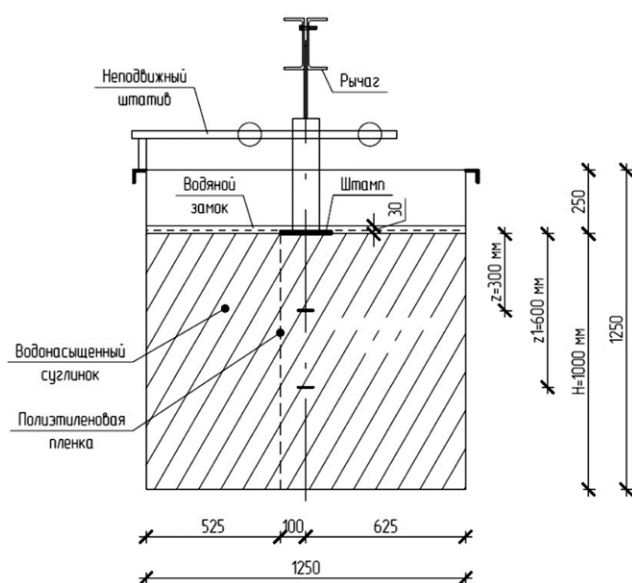


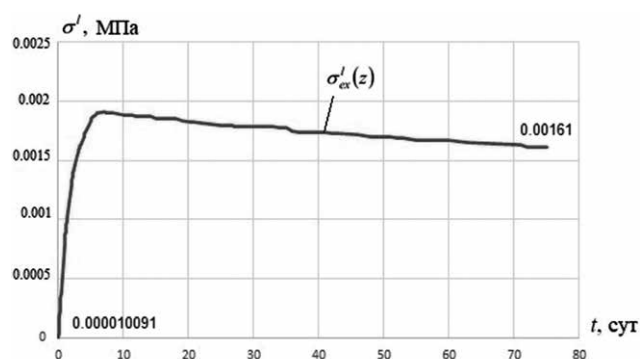
Рис. 1. Схема экспериментальной установки с расположением датчиков (рисунок авторов)  
Fig. 1. Experimental setup scheme with sensors (authors figure)

- для устранения сил трения, возникающих между стенками лотка и испытуемым грунтом, выполнялось армирование легкодеформируемой полиэтиленовой пленкой;
- между пленкой и образцом наносилась смазка (литол), что позволяло грунту перемещаться под нагрузкой вместе с пленкой.

По данным эксперимента [15] были построены график изменения поровых давлений во времени (рис. 2) и график осадки штампа (рис. 3) для датчика № 20 ( $z = 0.3$  м), анализ которых проводился с использованием метода линейной комбинации на предмет получения вязкоупругих характеристик.

Определение механических вязкоупругих характеристик кинематической модели грунта проводится путем обработки экспериментальных данных в рамках линейной наследственной теории вязкоупругости<sup>5</sup>. Алгоритм решения включает следующие этапы:

1. Экспериментальные данные представляются как функции времени в виде специальной ломаной линии (сплайн порядка I дефекта I).
2. С помощью переобозначений Вольтерра записывается изображение по Лапласу – Карсону.



Индекс «ex» происходит от слова experiment (эксперимент)

Рис. 2. График изменения порового давления во времени, полученный по данным датчика № 20 (график составлен авторами)

Fig. 2. Graph of pore pressure change over time for sensor No. 20 (graph constructed by the authors)

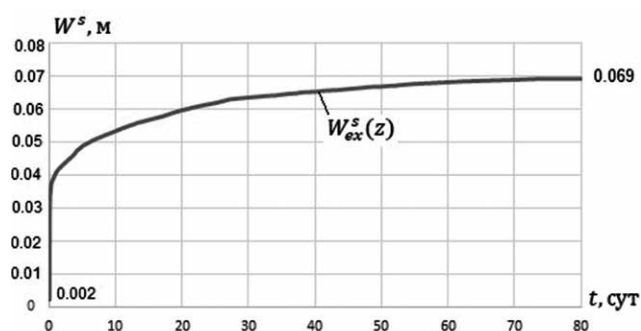


Рис. 3. Экспериментальный график осадки штампа для датчика № 20 (график составлен авторами)

Fig. 3. Experimental graph of stamp settlement for sensor No. 20 (graph constructed by the authors)

<sup>5</sup> Огибалов П. М., Ломакин В. А., Кишкин Б. П. Механика полимеров. Москва: ИМУ; 1975. 528 с.

Ильюшин А. А., Победра Б. Е. Основы математической теории термовязкоупругости. Москва: Наука; 1970. 280 с.

3. Вводится специализированный сплайн (ломаная линия), оригинал которой необходимо найти, и осуществляется приближенный переход от известного изображения к искомому оригиналу для фиксированных в пространстве точек совпадений (коллокаций) по методу ломаных Л. Е. Мальцева [14]. В результате получается система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Важно отметить, что назначение точек коллокаций существенно влияет на точность решения системы уравнений [16].
4. В результате решения СЛАУ высчитываются искомые параметры ломаной линии и определяются механические вязкоупругие характеристики грунта.

### 3. Результаты и обсуждение / Results and discussion

Выполним обработку экспериментальных данных для получения механических вязкоупругих характеристик.

Сначала получим функцию времени для поровых давлений:

$$\sigma'(t) = \sigma(0) \cdot \left[ 1 - \sum_{i=0}^{10} (c_i - c_{i+1}) \cdot (t - t_i^\sigma) \cdot h(t - t_i^\sigma) \right], \quad (1)$$

которая имеет запись в изображениях по Лапласу – Карсону:

$$[\sigma'(t)]^* = [\sigma']^*(p) = \sigma(0) \cdot \left[ 1 + \sum_{i=1}^{10} c_i \cdot \frac{1}{p} \left( e^{-p \cdot t_{i-1}^\sigma} - e^{-p \cdot t_i^\sigma} \right) \right]. \quad (2)$$

где  $c_i$  – искомые параметры, определяемые методом наименьших квадратов (МНК);

$c_0 = c_{11} = 0$ ;

$t_i^\sigma$  – фиксированные моменты времени, соответствующие функции  $\sigma'$ ,  $t_0^\sigma = 0$ ;

$\sigma(0) = 0.0000010091$  МПа – значение напряжения при  $t_0^\sigma = 0$ .

Подробно процесс получения функции времени для поровых давлений в оригинале и изображении для данного эксперимента приведен в работе [17].

На рис. 4 приведены графики функций оригинала  $\sigma'(t)$  (1) и изображения  $[\sigma']^*(p)$  (2). Начальный временной участок графиков для наглядности показан отдельно.

По полученному изображению (2) определим универсальный параметр кинематической модели в изображениях:

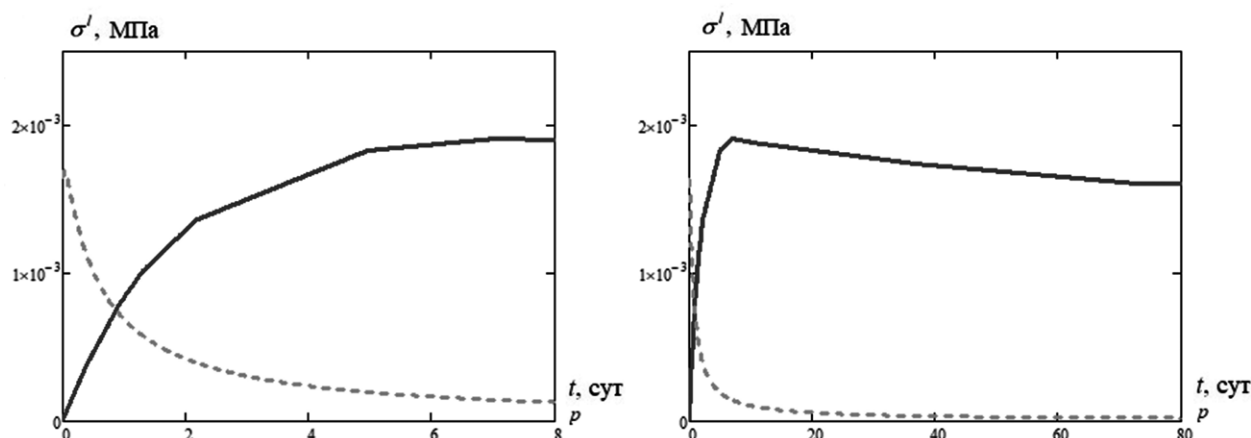


Рис. 4. Графики функций: оригинала  $\sigma'(t)$  (—) и изображения  $[\sigma']^*(p)$  (---) (график составлен авторами)

Fig. 4. Functions graphs: original  $\sigma'(t)$  (—) and transform  $[\sigma']^*(p)$  (---) (graph constructed by the authors)

$$[a^2]^*(p) = -\frac{1}{z_i} \cdot \ln \left[ 1 - \frac{[\sigma']^*(z_i, p)}{\sigma_o} \right].$$

Наличие второй степени означает, что в упругой постановке параметр  $a^2$  всегда имеет положительное значение.

Переход от изображения к оригиналу выполняем по методу ломаных.

Подробно процесс получения механической вязкоупругой характеристики (универсального параметра кинематической модели)  $a^2$  описан в работе [16].

На рис. 5 показан график механической вязкоупругой характеристики  $a^2(t)$ .

Механическую характеристику  $1/E^s$  определим по экспериментальному графику осадки штампа  $W_{ex}^s$  (рис. 3). Для этого по данным графика выберем необходимые значения и сведем их в таблицу 1. При назначении характерных временных отрезков важно учитывать, что график осадки штампа имеет резко возрастающее изменение значений на начальном временном участке, поэтому необходимо принять максимальное значение точек в начальный временной период.

На основании данных таблицы 1 запишем специальную ломаную линию (рис. 6):

$$W^s(t) = W(0) \cdot \left[ 1 - \sum_{i=0}^{10} (b_i - b_{i+1}) \cdot (t - t_i^w) \cdot h(t - t_i^w) \right], \quad (7)$$

где  $b_i$  – искомые параметры, определяемые методом наименьших квадратов (МНК);

$b_o = b_8 = 0$ ;

$t_i^w$  – фиксированные моменты времени, соответствующие функции  $W^s$ ,  $t_o^w = 0$ ;

$W(0) = 0.002$  м – значение осадки штампа в начальный момент времени.

Для 10 звеньев ломаной (7) определим значения безразмерных параметров исходя из формул

$$W(0) \cdot b_i = tg \alpha_i; \quad b_i = \frac{tg \alpha_i}{W(0)};$$

$b_o = 0$ ;  $b_1 = 323.741$ ;  $b_2 = 51.81598$ ;  $b_3 = 11.01796$ ;  $b_4 = 3.467742$ ;  $b_5 = 1.559343$ ;  $b_6 = 0.963333$ ;  $b_7 = 0.349197$ ;  $b_8 = 0.094337$ ;  $b_9 = 0.0325$ ;  $b_{10} = 0$ .

Таблица 1. Значение осадки штампа  
для звеньев ломаной линии  
Table 1. The value of the stamp draft  
for broken line links

Время $t$ , сут	Осадка штампа $W^s$ , м
0	0.002
0.0417	0.029
0.083	0.03328
0.25	0.03696
0.374	0.03782
1.958	0.04276
4.958	0.04854
22.083	0.0605
63	0.06822
75	0.069
80	0.069

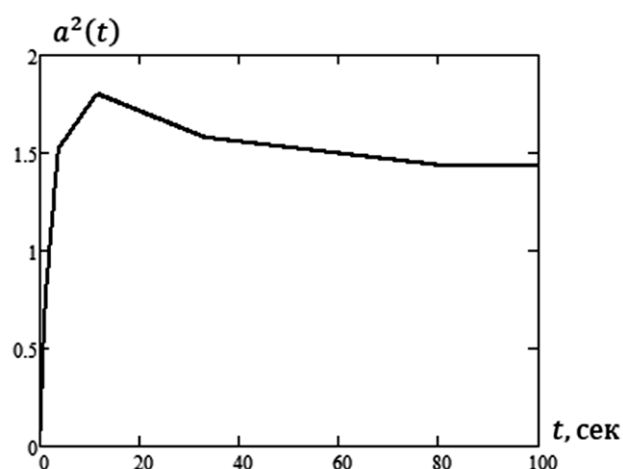


Рис. 5. График функции  $a^2(t)$   
(график составлен авторами)  
Fig. 5. Graph of the function  $a^2(t)$   
(graph constructed by the authors)



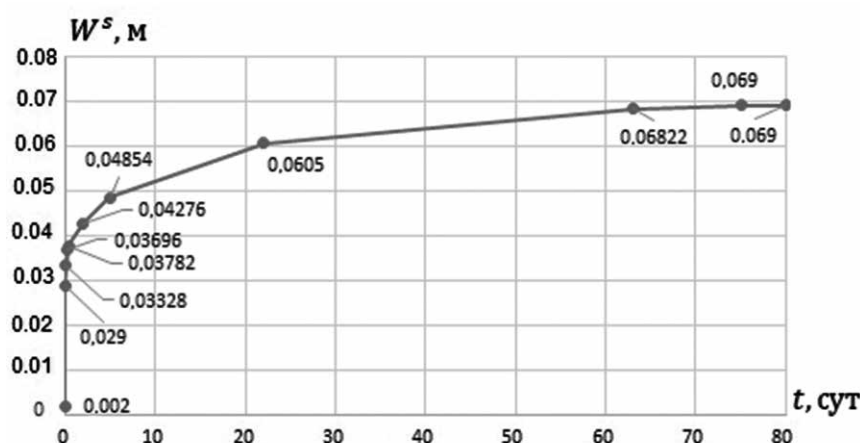


Рис. 6. График осадки штампа в виде ломаной линии (график составлен авторами)

Fig. 6. Stamp draft graph in the view of broken line (graph constructed by the authors)

Запишем изображение функции (7) по Лапласу – Карсону с теми же параметрами  $W(0)$ ,  $b_1, \dots, b_i$ :

$$[W^s(t)]^* = [W^s]^*(p^w) = W(0) \cdot \left[ 1 + \sum_{i=1}^{10} b_i \cdot \frac{1}{p^w} (e^{-p^w \cdot t_{i-1}^w} - e^{-p^w \cdot t_i^w}) \right]. \quad (8)$$

Параметры  $b_1, \dots, b_i$  известны из (7).

На рис. 7 покажем графики от оригинала  $W^s(t)$  (7) и изображения  $[W^s]^*(p^w)$  (8).

В кинематической модели грунта [14] используемые в теории вязкоупругости функции ползучести  $\Pi(t)$  и релаксации  $R(t)$ , записываются следующим образом:

$$\Pi^s(t) = 1/E^s(t); \quad R^s(t) = E^s(t).$$

Искомая механическая вязкоупругая характеристика  $\frac{1}{E^s}(t)$  количественно описывает свойство вязкоупругого материала накапливать деформацию при постоянной нагрузке, определяется на основании формулы для вычисления осадки [15]:

$$\frac{1}{E^s} = \frac{W_{ex}^s \cdot a^2}{\sigma_o \cdot (1 - e^{-a^2 \cdot H})},$$

и имеет запись в изображениях:

$$\begin{aligned} \left[ \frac{1}{E^s}(t) \right]^* &= \left[ \frac{1}{E^s} \right]^*(p) = [\Pi^s]^*(p) = \\ &= \frac{[W_{ex}^s(t)]^* \cdot [a^2(t)]^*}{\sigma_o \cdot \left( e^{-[a^2(t)]^* \cdot z} - e^{-[a^2(t)]^* \cdot H} \right)}, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $[\bar{a}^2(t)]^* = [\bar{a}^2]^*(p^a) =$

$$= a(0) \cdot \left[ 1 + \sum_{i=1}^8 d_i \cdot \frac{1}{p^a} (e^{-p^a \cdot t_{i-1}^a} - e^{-p^a \cdot t_i^a}) \right] - \text{изображение функции } a^2(t), \text{ параметры которого определены в [17];}$$

$\sigma_o = 0.0046$  МПа – нагрузка на штамп;  
 $z = 30$  см – глубина заложения датчика;  
 $H = 1$  м.

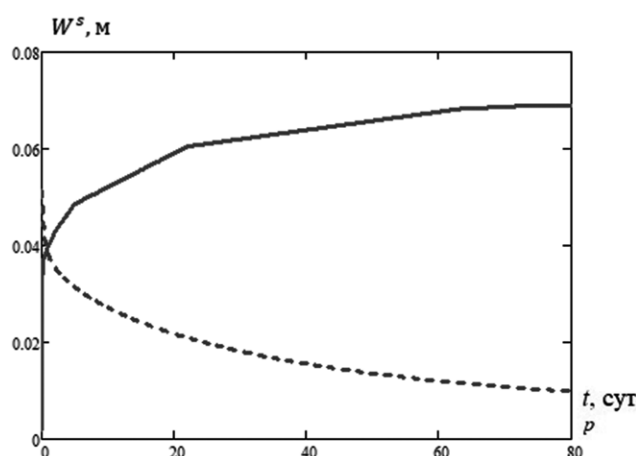


Рис. 7. Графики функций: оригинала  $W^s(t)$  (—)

и изображения  $[W^s]^*(p^w)$  (---)

(график составлен авторами)

Fig. 7. Functions graphs: original  $W^s(t)$  (—) and transform  $[W^s]^*(p^w)$  (---) (graph constructed by the authors)

Так как изображения  $[a^2(t)]^* = [a^2]^*(p)$  [17] и  $[W_s^{ex}(t)]^* = [W_s]^*(p^w)$  являются известными функциями, то выражение (9) также становится известной функцией, определив оригинал которой, получим функцию времени для параметра  $\frac{1}{E^s}$ .

Выполним переход от известного изображения (9) к оригиналу, как было сделано для  $a^2$  [17], по методу ломаных Л. Е. Мальцева [14].

Введем специализированный сплайн (ломаную линию), который аппроксимирует оригинал  $W^s$

$$\overline{\Pi^s}(t) = \Pi^s(0) \cdot \left[ 1 - \sum_{i=0}^8 (k_i - k_{i+1}) \cdot (t - t_i^w) \cdot h(t - t_i^w) \right] \quad (10)$$

и имеет запись в изображениях

$$[\overline{\Pi^s}(t)]^* = [\overline{\Pi^s}]^*(p^w) = a(0) \cdot \left[ 1 + \sum_{i=1}^8 k_i \cdot \frac{1}{p^w} \left( e^{-p^w \cdot t_{i-1}^w} - e^{-p^w \cdot t_i^w} \right) \right], \quad (11)$$

где  $k_0 = k_9 = 0$ ,

$t_i^w$  – моменты времени, соответствующие функции  $W^s$ ,  $t_0^w = 0$ ;

$p^w$  – точки коллокаций (совпадений) для функции  $W^s$ ;

$\Pi^s(0)$  и  $k_i$  – искомые параметры, определяемые по методу ломаных Л. Е. Мальцева из условия совпадения искомой аппроксимации  $[\overline{\Pi^s}]^*(p^w)$  (11) с заданной функцией  $[\Pi^s]^*(p)$  (9):

$$[\overline{\Pi^s}]^*(p^w) = [\Pi^s]^*(p)$$

на системе точек коллокаций  $\{p_j^w\}_{j=1}^{j=8}$ .

В результате получаем систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ):

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^8 k_i \cdot \left( e^{-p_j^w \cdot t_{i-1}^w} - e^{-p_j^w \cdot t_i^w} \right) = \left[ \frac{[\Pi^s]^*(p_j)}{\Pi^s(0)} - 1 \right] \cdot p_j^w \\ \sum_{i=1}^8 k_i \cdot (t_i^w - t_{i-1}^w) = \frac{[\Pi^s]^*(p=0)}{\Pi^s(0)} - 1 \end{cases}.$$

Последнее уравнение СЛАУ записывается специальным образом для точки  $p = 0$  или для точки  $t = \infty$  в оригинале.

При  $p = \infty$  сразу определяем параметр  $\Pi^s(0)$ :

$$[\overline{\Pi^s}]^*(p^w = \infty) = [\Pi^s]^*(p = \infty):$$

$$[\overline{\Pi^s}]^*(p^w = \infty) = \Pi^s(0) \cdot \left[ 1 + \sum_{i=1}^8 k_i \cdot \frac{1}{\infty} \left( e^{-\infty \cdot t_{i-1}^w} - e^{-\infty \cdot t_i^w} \right) \right] = \Pi^s(0),$$

$$[\Pi^s]^*(p = \infty) = \frac{[W_s^{ex}]^*(p = \infty) \cdot [a^2]^*(p = \infty)}{\sigma_0 \cdot \left( e^{-[a^2]^*(p=\infty) \cdot z} - e^{-[a^2]^*(p=\infty) \cdot H} \right)};$$

$$[a^2]^*(p = \infty) = [a^2](t = 0) = a(0); \quad [W_s^e x]^*(p = \infty) = [W_s^e x](t = 0) = W(0).$$



Расчет выполняем по осадке штампа, который расположен сверху над образцом на глубине  $z = 0$ , поэтому

$$[\Pi^s]^*(p = \infty) = \frac{W(0) \cdot a(0)}{\sigma_0 \cdot (e^{-a(0) \cdot z} - e^{-a(0) \cdot H})} = \frac{0.002 \cdot 0.007320351}{0.0046 \cdot (e^{-0.007320351 \cdot 0} - e^{-0.007320351 \cdot 1})} = 0.436375931 \left( \frac{1}{\text{МПа}} \right).$$

Точки коллокаций  $p_j^w$  назначаем из решения трансцендентного уравнения [18]:

$$m \left( e^{-p_j^w \cdot t_{j-1}^w} - e^{-p_j^w \cdot t_j^w} \right) = \left( e^{-p_j^w \cdot t_j^w} - e^{-p_{j+1}^w \cdot t_{j+1}^w} \right),$$

согласно которому наддиагональные элементы матрицы составляют 0.8 от диагональных [16].

В результате решения СЛАУ определяем искомые параметры  $k_i$ :  
 $k_1 = 207.7841960474$ ;  $k_2 = 329.2237116718$ ;  $k_3 = 7.2229179441$ ;  $k_4 = 7.5448590342$ ;  $k_5 = 7.2298796519$ ;  
 $k_6 = 1.5074320511$ ;  $k_7 = -0.458903743$ ;  $k_8 = -0.0275651823$ .

На рис. 8 приведены графики функции ползучести скелета  $[\Pi^s]^*(p)$  и  $\Pi^s(t)$ .

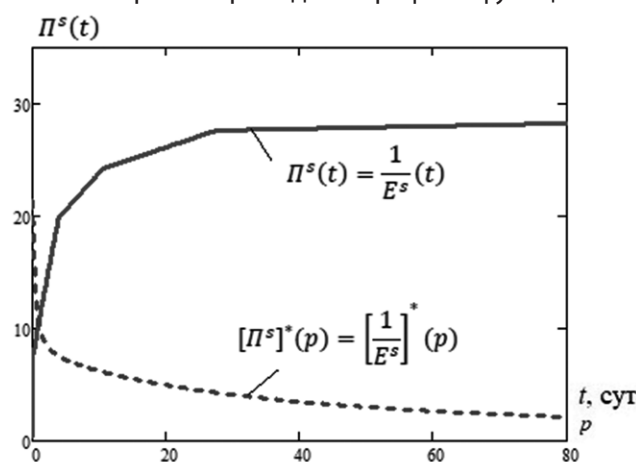


Рис. 8. Графики функций ползучести: оригинала  $\Pi^s(t)$  (—) и изображения  $[\Pi^s]^*(p)$  (---) (график составлен авторами)  
Fig. 8. Graphs of creep functions: original  $\Pi^s(t)$  (—) and images  $[\Pi^s]^*(p)$  (---)

#### 4. Заключение / Conclusions

На основе проведенного эксперимента с крупногабаритным образцом из водонасыщенного суглинка был выполнен расчет напряженно-деформированного состояния вязкоупругого основания по кинематической модели грунта в рамках линейной наследственной теории вязкоупругости. Экспериментальные кривые порового давления и осадки штампа представлены как функции времени по методу ломаных Л. Е. Мальцева. Показана методика получения оригинала от известного изображения. С помощью полученных функций времени определены механические вязкоупругие характеристики кинематической модели  $a^2$  и  $\frac{1}{E^s}$ . Полученные характеристики применимы

для расчета напряженно-деформированного состояния вязкоупругого водонасыщенного основания, нагруженного полосовой нагрузкой.



**Вклад авторов.** Авторы внесли равный вклад в подготовку публикации.  
**Author contributions.** All authors contributed equally to preparing the publication.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
**Conflict of interest.** The authors declare no relevant conflict of interest.

#### Список литературы

1. Drucker D. C., Gibson R. E., Henkel D. Soil mechanics and work-hardening theories of plasticity. *American Society of Civil Engineers*. 1957;122(1). <https://doi.org/10.1061/taceat.0007430>
2. Тер-Мартirosян З. Г. *Прогноз механических процессов в массивах многофазных грунтов*. Москва: Недра; 1986. 292 с.

3. Тер-Мартirosян З. Г., Тер-Мартirosян А. З., Лузин И. Н. Напряженно-деформированное состояние конечной прямоугольной области под действием равномерно распределенной полосовой нагрузки. *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2018;(2):6–13. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35417650>
4. Тер-Мартirosян З. Г., Филиппов К. А. Решение задачи осадки сваи под действием вертикальной статической нагрузки с учетом пластических свойств грунтов основания. *Вестник МГСУ*. 2022;17(7):871–881. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2022.7.871-881>
5. Широков В. Н., Заболоцкая А. А. Опыт определения деформационных характеристик глинистых грунтов в условиях компрессионного сжатия статическим нагружением и в режиме релаксации напряжений. *Вестник Филиала Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова в городе Душанбе*. 2021;(3):115–127. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47473814>
6. Жакулин А. С., Жакулина А. А., Жусупбеков А. Ж., Нефедов В. Н., Тунгатаров А. М., Попов Н. И. Прогноз осадок фундаментов по упругопластической модели глинистых грунтов. *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2022;(3):6–9. <https://ofmg.ru/index.php/ofmg/article/view/6535>
7. Абелев М. Ю., Аверин И. В., Абелев К. М., Чунюк Д. Ю., Алмазов А. А. *Строительство на слабых водонасыщенных глинистых грунтах*. Москва: Издательство АСВ, 2023. 170 с. ISBN 978-5-4323-0483-4. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54107159>
8. Шашкин А. Г., Шашкин К. Г., Васенин В. А. О предсказательной способности моделей механики грунтов. В сб.: *Сергеевские чтения. Фундаментальные и прикладные вопросы современного грунтоведения: Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии, Санкт-Петербург, 31 марта – 01 апреля 2022 года*. Москва: Геоинфо; 2022. С. 326–332. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48425502>
9. Jia-Cai Liu, Guo-Hui Lei, Xu-Dong Wang. One-dimensional consolidation of visco-elastic marine clay under depth-varying and time-dependent load. *Marine Georesources & Geotechnology*. 2015;33(4):337–347. <https://doi.org/10.1080/1064119X.2013.877109>
10. Xiao-mi Li, Qian-qing Zhang, Shan-wei Liu. Semianalytical solution for long-term settlement of a single pile embedded in fractional derivative viscoelastic soils. *International Journal of Geomechanics*. 2021;21(2):04020246. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0001906](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001906)
11. Демин В. А. *Экспериментальное и теоретическое исследование напряженно-деформированного состояния двухфазной вязкоупругой среды: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук*. Санкт-Петербург; 2005. 30 с. URL: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01002930116?page=1&rotate=0&theme=white>
12. Твердохлеб С. А., Воронцов В. В. Результаты лабораторного исследования консолидации слабого водонасыщенного глинистого макрообразца удаленного от дневной поверхности. В сб.: *Актуальные проблемы архитектуры, строительства, экологии и энергосбережения в условиях Западной Сибири: Сборник материалов международной научно-практической конференции: в 2 томах. Том 1. Тюмень, 23 апреля 2015 года*. Тюмень: Тюменский государственный архитектурно-строительный университет; 2015. С. 64–72.
13. Воронцов В. В., Набоков А. В., Овчинников В. П., Твердохлеб С. А. Результаты компрессионного сжатия слабых водонасыщенных глинистых макрообразцов с применением «грунтового замка». *Научно-технический вестник Поволжья*. 2015;(1):60–65. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23136613>
14. Мальцев Л. Е., Бай В. Ф., Мальцева Т. В. *Кинематическая модель грунта и биоматериалов*. Санкт-Петербург: Стройиздат; 2002. 336 с.
15. Бай В. Ф., Набоков А. В., Воронцов В. В., Краев А. Н. Экспериментальное исследование нагруженного основания из водонасыщенного армированного суглинка. *Известия высших учебных заведений. Нефть и газ*. 2008;(1):102–104.
16. Мальцева Т. В., Парфенова Т. В. Влияние точек совпадений в методе ломаных на обусловленность матрицы. *Известия высших учебных заведений. Нефть и газ*. 2002;(3):101–106. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22897092>
17. Крижанивская Т. В., Воронцов В. В., Тайех Б. А. Расчет вязкоупругого водонасыщенного глинистого основания при действии полосовой нагрузки. *Архитектура, строительство, транспорт*. 2025;5(2):50–63. <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-2-50-63>
18. Крижанивская Т. В., Бай В. Ф., Мальцева Т. В., Коркишко А. Н. *Расчет водонасыщенных грунтовых оснований*. Тюмень: Тюменский индустриальный университет; 2020. 141 с. ISBN 978-5-9961-2344-5.

## References

1. Drucker D. C., Gibson R. E., Henkel D. Soil mechanics and work-hardening theories of plasticity. *American Society of Civil Engineers*. 1957;122(1). <https://doi.org/10.1061/taceat.0007430>
2. Ter-Martirosyan Z. G. *Prediction of mechanical processes in multiphase soil masses*. Moscow: Nedra, 1986. (In Russ.)
3. Ter-Martirosyan Z. G., Ter-Martirosyan A. Z., Luzin I. N. The stress-strain state of a finite rectangular domain under a uniformly distributed strip load. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2018;55(2):68–75. <https://doi.org/10.1007/s11204-018-9505-5>
4. Ter-Martirosyan Z. G., Filippov K. A. A solution to the problem of pile settlement caused by vertical static loading with consideration to plastic properties of the foundation soil. *Vestnik MGSU*. 2022;17(7):871–881. (In Russ.) <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2022.7.871-881>
5. Shirokov V. N., Zabolotskaya A. A. Experience in determining the deformation characteristics of clay soils under conditions of oedometer compression with static loading and in the stress relaxation mode. *Bulletin of Lomonosov Moscow State University in Dushanbe*. 2021;(3):115–127. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47473814>
6. Zhakulin A. S., Zhakulina A. A., Zhusupbekov A. Z., Nefedov V. N., Tungatarov A. M., Popov N. I. Prediction of the settlement of foundations by an elastic-plastic model of clay soils. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2022;59(3):224–228. <https://doi.org/10.1007/s11204-022-09805-8>
7. Abelev M. Yu., Averin I. V., Abelev K. M., Chunyuk D. Yu., Almazov A. A. *Construction on weak, saturated clay soils*. Moscow: Izdatel'stvo ASV, 2023. ISBN 978-5-4323-0483-4. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54107159>
8. Shashkin A. G., Shashkin K. G., Vasenin V. A. On the predictive capability of soil mechanics models. In: *Sergeevskie chteniya. Fundamental'nye i prikladnye voprosy sovremennogo gruntovedeniya: Materialy godichnoy sessii Nauchnogo soveta RAN po problemam geologii, inzhenernoy geologii i gidrogeologii, Sankt-Peterburg, 31 March – 01 April, 2022*. Moscow: Geoinfo, 2022. P. 326–332. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48425502>
9. Jia-Cai Liu, Guo-Hui Lei, Xu-Dong Wang. One-dimensional consolidation of visco-elastic marine clay under depth-varying and time-dependent load. *Marine Georesources & Geotechnology*. 2015;33(4):337–347. <https://doi.org/10.1080/1064119X.2013.877109>
10. Xiao-mi Li, Qian-qing Zhang, Shan-wei Liu. Semianalytical solution for long-term settlement of a single pile embedded in fractional derivative viscoelastic soils. *International Journal of Geomechanics*. 2021;21(2):04020246. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0001906](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001906)
11. Demin V. A. *Experimental and theoretical study of the stress-strain state of a two-phase viscoelastic medium: Dissertation abstract for the candidate of technical sciences degree*. St. Petersburg; 2005. 30 p. (In Russ.) URL: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01002930116?page=1&rotate=0&theme=white>
12. Tverdokhlebov S. A., Vorontsov V. V. Laboratory test results on the consolidation of a soft, water-saturated clay macro-sample from a significant depth. In: *Aktual'nye problemy arkhitektury, stroitel'stva, ekologii i energosberezheniya v usloviyakh Zapadnoy Sibiri: Sbornik materialov mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: in 2 vol. Vol. 1. Tyumen, 23 April, 2015*. Tyumen: Tyumen State University of Architecture and Civil Engineering; 2015. P. 64–72. (In Russ.)
13. Vorontsov V. V., Nabokov A. V., Ovchinnikov V. P., Tverdokhlebov S. A. Results of compression pressure weak water-saturated clay macro sample using the "ground lock". *Scientific and Technical Volga Region Bulletin*. 2015;(1):60–65. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23136613>
14. Maltsev L. E., Bai V. F., Maltseva T. V. *Kinematic model of soil and biomaterials*. Saint Petersburg: Stroyizdat; 2002. (In Russ.)
15. Bai V. F., Nabokov A. V., Vorontsov V. V., Kraev A. N. Experimental study of the stressed foundation from the water saturated reinforced loamy soil. *Oil and gas studies*. 2008;(1):102–104.
16. Maltseva T. V., Parfenova T. V. Influence of coincidence points in the method of lines on matrix conditioning. *Oil and Gas Studies*. 2002;(3):101–106. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22897092>
17. Krizhanivskaya T. V., Vorontsov V. V., Tayeh B. A. Analysis of a viscoelastic water-saturated clay foundation subjected to a strip load. *Architecture, Construction, Transport*. 2025;5(2):50–63. (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-2-50-63>
18. Krizhanivskaya T. V., Bai V. F., Maltseva T. V., Korkishko A. N. *Calculation of water-saturated soil foundations*. Tyumen: Industrial University of Tyumen; 2020. 141 p. ISBN 978-5-9961-2344-5. (In Russ.)



#### Информация об авторах

**Крижанивская Татьяна Валерьевна**, канд. техн. наук, доцент кафедры строительных конструкций, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, krizhanivskajatv@tyuiu.ru, <https://orcid.org/0009-0007-5433-2405>

**Воронцов Вячеслав Викторович**, канд. техн. наук, доцент кафедры строительных конструкций, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, vorontsovvv@tyuiu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0141-7452>

**Тайех Бассам А.**, PhD, профессор, Исламский университет Газы, Газа, Палестина, <https://orcid.org/0000-0002-2941-3402>

**Куличенко Фаина Сергеевна**, магистрант, Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы, Москва, Российская Федерация, gardenfaina@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-5091-1262>

#### Information about the authors

**Tatiana V. Krizhanivskaya**, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor in the Department of Building Structures, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, krizhanivskajatv@tyuiu.ru, <https://orcid.org/0009-0007-5433-2405>

**Viacheslav V. Vorontsov**, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor in the Department of Building Structures, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, vorontsovvv@tyuiu.ru

**Bassam A. Tayeh**, PhD, Professor, Islamic University of Gaza, Gaza, Palestine, <https://orcid.org/0000-0002-2941-3402>

**Faina S. Kulichenko**, Graduate Student, Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, Russian Federation, gardenfaina@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-5091-1262>

*Получена 12 августа 2025 г., одобрена 26 ноября 2025 г., принята к публикации 08 декабря 2025 г.*

*Received 12 August 2025, Approved 26 November 2025, Accepted for publication 08 December 2025*