

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2024, Том 11, № 3 / 2024, Vol. 11, Iss. 3 <https://t-s.today/issue-3-2024.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/14SATS324.pdf>

DOI: 10.15862/14SATS324 (<https://doi.org/10.15862/14SATS324>)

2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения (технические науки)

Статья подготовлена в рамках реализации государственного задания в сфере науки на выполнение научных проектов, реализуемых коллективами образовательных организаций высшего образования, подведомственных Минобрнауки России по проекту «Компьютерное моделирование механических, температурных и динамических процессов в слабых и многолетнемерзлых грунтах для обеспечения надежности грунтовых оснований инженерных сооружений» (№ FEWN-2024-0006)

УДК 624.13

Учет ползучести грунтов при расчетах фундаментов

Гультяев Р.С., Стаселько Е.Л., Анфиногенов В.А., Краев А.Н.

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия

Автор, ответственный за переписку: Гультяев Роман Сергеевич, e-mail: qetuo1951@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена расчетам осадок фундаментов зданий и сооружений с учетом реологических свойств грунтов, а именно проявления ползучести. Авторами представлены случаи чрезвычайных ситуаций, произошедших в разные временные промежутки вследствие отсутствия учета в расчетных моделях проявления реологических свойств грунтового основания. В статье дается пояснение механизма проявления процесса ползучести грунтов. Описаны основные стадии развития ползучести в процессе нагружения основания. Особое внимание авторами статьи уделяется анализу основных факторов, существенно влияющих на реологические свойства грунтов. Рассмотрена как научная, так и нормативная литература, описывающая учет в расчетах оснований реологических свойств грунтов. В статье приведены способы определения основных параметров, описывающих ползучесть, таких как коэффициент вязкости и коэффициент вторичной консолидации грунтов. Выполнен обзор нормативной литературы, позволяющей определить

параметры ползучести. Представлен анализ алгоритмов учёта ползучести грунтов в различных методиках расчета осадок оснований. Проанализированы основные отличия в расчетах осадок оснований с учетом ползучести отечественных и зарубежных авторов. В заключении авторы статьи приводят преимущества алгоритмов, описывающих проявление реологических свойств грунтов при расчете оснований зданий и сооружений, возведенных на глинистых грунтах по сравнению с алгоритмами, не учитывающими процесс деформирования грунтового основания во времени. Авторами отмечается необходимость апробации методик, используемых для получения параметров ползучести для конкретных грунтовых условий.

Ключевые слова: реологические свойства грунтов; ползучесть грунтов; коэффициент вязкости; коэффициент вторичной консолидации; осадка оснований; многолетнемерзлые грунты; глинистые грунты

Accounting for soil creep in foundation calculations

Roman S. Gulyaev, Egor L. Staselko, Vitaliy A. Anfinogenov, Andrey N. Kraev

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

Corresponding author: Roman S. Gulyaev, e-mail: qetuo1951@mail.ru

Abstract. This article is dedicated to the calculation of building and structure foundation settlements, taking into account the rheological properties of soils, specifically the manifestation of creep. The authors present cases of emergency situations that occurred at different time intervals due to the lack of consideration for the manifestation of rheological properties in the foundation soil in calculation models. The article explains the mechanism underlying the creep process in soils. It describes the main stages of creep development during foundation loading. The authors pay particular attention to analyzing the key factors that significantly influence the rheological properties of soils. Both scientific and normative literature addressing the consideration of rheological properties in foundation calculations are reviewed. The article outlines methods for determining key parameters that describe creep, such as the viscosity coefficient and secondary consolidation coefficient of soils. A review of normative literature that allows for the

determination of creep parameters is conducted. An analysis of algorithms for accounting for soil creep in various settlement calculation methodologies is presented. The main differences in settlement calculations considering creep by domestic and foreign authors are analyzed. In conclusion, the authors highlight the advantages of algorithms that describe the manifestation of rheological properties of soils when calculating foundations for buildings and structures erected on clayey soils, compared to algorithms that do not account for the time-dependent deformation process of soil foundations. The authors emphasize the necessity for testing methodologies used to obtain creep parameters for specific soil conditions.

Keywords: rheological properties of soils; soil creep; viscosity coefficient; secondary consolidation coefficient; foundation settlement; permafrost soils; clayey soils

Данная статья доступна по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная

This article is available under the Creative Commons “Attribution” 4.0 Global License



Введение

Introduction

Ползучесть грунтов — это способность грунтов деформироваться под действием постоянной нагрузки с течением времени. Это явление может привести к ненормативным осадкам фундаментов зданий и сооружений, что в свою очередь может негативно влиять на их долговечность и безопасность эксплуатации.¹

Ползучесть грунтов зависит от их типа, структуры, влажности и ряда других факторов. Ползучесть может проявляться как в краткосрочной, так и в долгосрочной перспективе. Для адекватного учета ползучести при проектировании фундаментов необходимо использовать методы и модели, которые позволяют точно оценить его влияние на поведение конструкции здания или сооружения [1–4].

Проектирование фундаментов с учетом ползучести грунтов обеспечивает надежность и долговечность строительных объектов, предотвращает их преждевременное разрушение и снижает риск возникновения аварийных ситуаций. Ниже представлены методы расчета фундаментов с учетом ползучести грунтов и рекомендации по их использованию при проектировании [5–7].

Состояние проблемы

State of the problem

В настоящее время зафиксировано множество случаев, когда длительная осадка и крены зданий и сооружений вызваны ползучестью глинистых грунтов. Это явление также приводит к смещению подпорных стенок и нарушению устойчивости склонов и насыпей. Ползучесть грунтов является одной из причин оползней, что наносит значительный ущерб экономике государства.¹

Ярким примером ползучести глинистых грунтов является Пизанская башня, построенная в 1350 году. Под южной стороной башни находились слои ила и глинистого грунта, тогда как слой песка был значительно тоньше, чем с северной стороны. В результате за 176 лет строительства башня осела и наклонилась на 2,1 м. Даже после завершения строительства и в течение почти шести столетий башня продолжала оседать с постоянной скоростью около 2 мм в год [8].

¹ Вялов, С.С. Реологические основы механики грунтов / С.С. Вялов. — М.: Высшая школа, 1978. — 447 с. — Текст: непосредственный. (дата обращения: 21.08.2024).

Интересным примером длительной неравномерной осадки и крена сооружений, вызванных неравномерным залеганием слабых глинистых грунтов и нарушением технологии строительства, являются две соседние башни в Болонье (Италия). Башня Азинелли высотой 97,2 м имеет наклон $1,30^\circ$ и смещение верхней части 2,2 м. Соседняя башня Гаризенда была уменьшена в высоте в несколько раз из-за чрезмерного наклона, который превысил 3 м. В настоящее время ее высота составляет 48 м [9; 10].

Примером потери прочности фундамента из глинистых грунтов является авария на силосном здании элеватора Транскон в Канаде. Максимальная осадка элеватора составила 8,8 м, минимальная — 1,5 м, а угол отклонения от вертикали достиг $26^\circ 53'$. Последствия аварии показаны на рисунке 1.2 [11].

Другим примером реологических свойств является длительная деформация каменно-земляной плотины Чарвакской ГЭС, высота которой достигла 168 м. Максимальная строительная осадка ядра из лессовидного суглинка составила 8,4 м, а на завершающем этапе строительства наблюдалось дальнейшее увеличение поперечного расширения ядра плотины и ее боковых призм.¹

Примером ползучести глинистых грунтов, происходящей в основании, является деформация фронтальной стенки напорного бассейна Фархадской ГЭС. Этот бассейн расположен на массиве лессовидных суглинков на краю крутого склона (уклон составляет 1:2–1:2,5). За 9 лет (1950–1958) деформация фронтальной стенки достигла почти 50 см.¹

В истории известен случай деформации устоя железобетонного арочного виадука в Швейцарии, вызванный ползучестью глинистого грунта на склоне, где располагался один из устоев (рис. 1). Смещение устоя началось сразу после строительства и развивалось примерно с постоянной скоростью 37 мм в год, достигнув 480 мм за 13 лет. При этом осадка составила всего 14,9 мм. Процесс деформации затронул слой грунта толщиной 12 м. Мост был реконструирован.¹

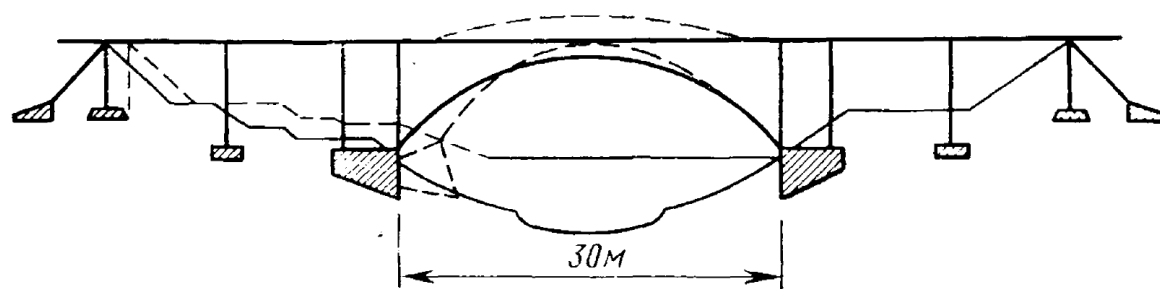


Рисунок 1. Смещение линии устоя виадука в результате ползучести грунта в Швейцарии (показано пунктиром)¹

Figure 1. Displacement of the viaduct stiffener line as a result of soil creep in Switzerland (shown in dotted line)¹

Примером проявления ползучести грунтового основания является длительная осадка глинистых илов, залегающих в основании земляных плотин Каховской ГЭС на Днепре. Эти илы при влажности 77 % и пределе текучести 68 % находятся в мягкопластичном состоянии за счет структурного сцепления, несмотря на их текучесть. Сжимаемость илов под нагрузкой $3,0 \times 10^5$ Па изменяется от 150 до 200 мм/м. Залегая слоем толщиной от 1,0 до 4,0 м и перекрытые 8-метровым слоем мелкозернистого песка, илы дали осадку на 970 мм при общей осадке основания, включая толщу песчано-гравийных отложений, 1 120 мм. Эти осадки развивались в течение длительного периода времени, а на отдельных участках продолжались и спустя 15 лет.¹

Таким образом, учет ползучести грунтов при расчете осадки зданий и сооружений позволяет прогнозировать развитие деформаций на определенный период времени, что позволит предотвратить возможный ущерб экономике государства.

Основная часть

Main part

Ползучесть грунтов

Soil creep

Ползучесть — это деформационный процесс, который продолжается во времени даже при постоянной нагрузке. Ползучесть может происходить с убывающей скоростью (затухающая ползучесть) или с возрастающей скоростью (незатухающая ползучесть) (рис. 2).¹

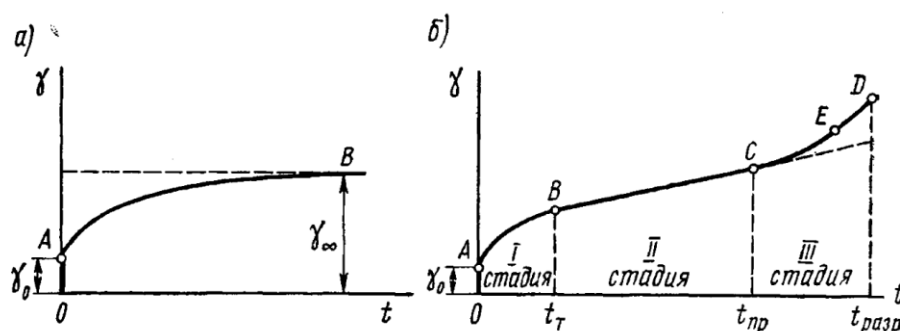


Рисунок 2. Кривые изменения во времени деформации:
а — затухающая ползучесть; б — незатухающая ползучесть¹

Figure 2. Time-varying strain curves: a — exhaustion creep; b — viscous creep¹

Общая деформация складывается из условно-мгновенной деформации γ_0 , возникающей сразу после приложения нагрузки, и деформации, развивающейся во времени $\gamma(t)$ (рис. 2). Общая деформация вычисляется по следующей закономерности¹:

$$\gamma = \gamma_0 + \gamma(t). \quad (1)$$

При затухающей ползучести деформация $\gamma(t)$ стремится к некоторому конечному значению $\gamma_\infty = \text{const}$, которое зависит от величины нагрузки.¹

Отечественные исследователи разделяют незатухающую ползучесть на несколько стадий: условно мгновенную деформацию γ_0 , стадию затухающей, неустановившейся ползучести (участок АВ), стадию установившегося течения (участок ВС) и стадию прогрессирующего течения (участок CD) (рис. 2). На стадии I деформация развивается с убывающей скоростью. На стадии II скорость деформации, достигнув минимального значения, становится практически постоянной ($\dot{\gamma} = \text{const}$); Эту стадию иногда называют стадией вязкопластического течения. На стадии III скорость деформации начинает увеличиваться, что может привести к разрушению (хрупкому или вязкому) грунта, и эту стадию иногда называют стадией разрушения.¹ Кроме того, целесообразно разделять стадию III на две стадии: первую (участок CE), на которой развивающаяся пластическая деформация еще не приводит к разрушению, и вторую (участок ED), на которой интенсивное развитие микротрещин и быстрый рост деформации приводят к разрушению. Такое разделение важно, так как на первой стадии некоторые грунты могут сохранять несущую способность в течение значительного периода времени.¹

В зарубежных исследованиях также различают затухающую и незатухающую ползучесть (рис. 3) [12].

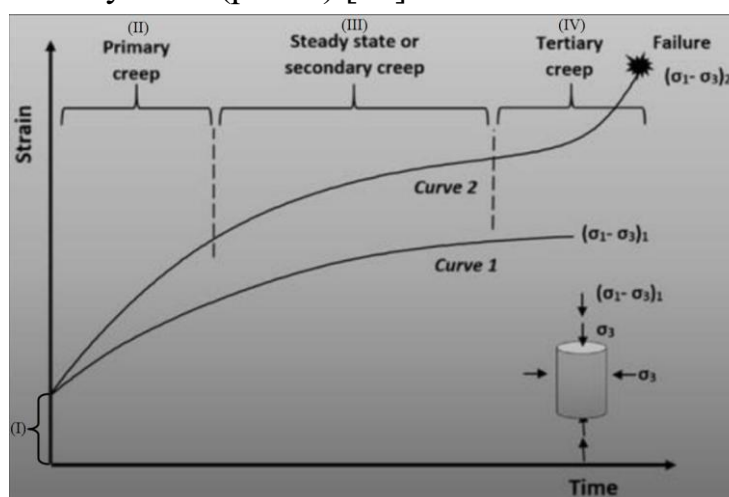


Рисунок 3. Фазы ползучести грунта [12]

Figure 3. Phases of soil creep [12]

Однако зарубежные авторы используют иные обозначения стадий ползучести: I — малые обратимые деформации, II — замедленная ползучесть (первичная ползучесть), III — устойчивое состояние ускоренной ползучести (вторичная ползучесть), IV — фаза немедленного разрушения (третичная ползучесть) [12].

Практика показала, что ползучесть особенно заметна при эксплуатации фундаментов в многолетнемерзлых грунтах, где наличие льда, выполняющего роль цементирующего компонента, делает грунты прочнее по сравнению с немерзлыми дисперсными грунтами. Однако льдистость придает грунтам и выраженные вязкие свойства, что требует реологического подхода к оценке их прочности и деформаций [6; 13].

Расчет осадки оснований зданий и сооружений с учетом ползучести

Calculation of foundations settlement of buildings and structures taking creep into account

В нормативной литературе РФ описан расчет осадок оснований зданий и сооружений, применяемый только для сильнольдистых многолетнемерзлых грунтов.² Формула для расчета осадок имеет вид:

$$s = s_p + s_t, \quad (2)$$

где:

s_p — осадка, обусловленная уплотнением основания под нагрузкой;

s_t — осадка, обусловленная пластично-вязким течением грунта за заданный срок эксплуатации сооружения, определяемая по формуле:

$$s_t = t_u \cdot v, \quad (3)$$

здесь:

t_u — заданный срок эксплуатации здания (сооружения), лет;

v — скорость осадки, м/год, определяемая исходя из модели линейно- или нелинейновязкого полупространства; допускается определять по формуле:

$$v = \sum_{j=1}^m v_j, \quad (4)$$

где:

m — число месяцев в году, в течение которых развиваются деформации ползучести грунтов;

v_j — среднемесячная скорость осадки, м/мес., определяемая по формуле:

$$v_j = 730 \cdot \sum_{k=1}^n h_k \cdot \xi_k, \quad (5)$$

² СП 25.13330.2020. Основания и фундаменты на вечноммерзлых грунтах. — М.: ФЦС, 2020. — 52 с. (дата обращения: 29.08.2024).

где:

n — число слоев грунта, в пределах которых определяется среднемесячная температура $T_{j,k}$;

h_k — толщина k -го слоя грунта, м, принимается не более $0,2 b$ (b — меньший размер подошвы фундамента);

ξ_k — скорость относительной деформации k -го слоя грунта, $1/\text{ч}$, при среднемесячной температуре грунта $T_{j,k}$, определяемая по формуле:

$$\xi_k = \frac{1}{2 \cdot \eta_k} \left(\sigma_k - \frac{2}{3} \sigma_{L,k} \right), \quad (6)$$

здесь:

η_k — коэффициент вязкости k -го слоя грунта основания, $\text{кПа} \cdot \text{ч}$, определяемый согласно³;

$\sigma_{L,k}$ — предел текучести k -го слоя грунта основания, кПа ;

σ_k — напряжение, кПа , в k -м слое грунта основания.

В рассмотренной методике свойство ползучести грунта учитывается коэффициентом вязкости. Коэффициент вязкости учитывает деформацию грунта с течением времени под действием постоянной нагрузки.¹

В нормативной литературе описана методика определения коэффициента вязкости для сильнольдистых грунтов, а также для песчаных и глинистых грунтов с содержанием органического вещества не более 10 %. Для этого грунт испытывают методом одноосного сжатия. При испытании грунтов методом одноосного сжатия образец нагружают вертикальной нагрузкой, при этом у образца есть возможность неограниченного бокового расширения вплоть до момента разрушения.³

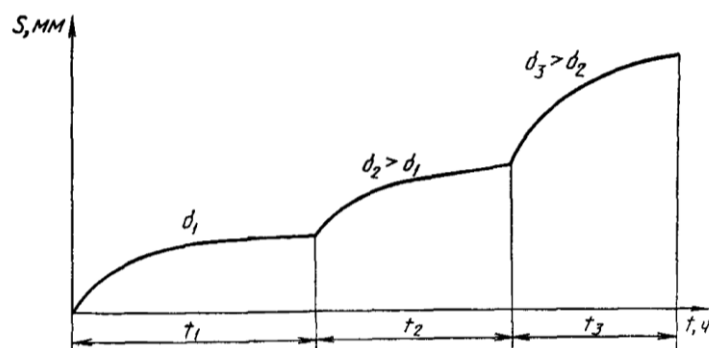


Рисунок 4. Кривые ползучести грунта при различных постоянных нагрузках³

Figure 4. Soil creep curves at different constant loads³

³ ГОСТ 12248.9-2020. Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости мерзлых грунтов методом одноосного сжатия. — М.: Стандартинформ, 2020. — 22 с. — Текст: непосредственный. (дата обращения: 22.08.2024).

По результатам испытаний строят два графика: кривую ползучести и реологическую кривую. Кривая ползучести представляет собой график зависимости приращения деформации от времени (рис. 4). Реологическая кривая показывает, как изменяется скорость относительной деформации образца в зависимости от напряжения (рис. 5).³

По данным графикам определяют коэффициент вязкости, который затем используют при расчете осадки фундаментов зданий и сооружений.³

Помимо нормативной литературы, алгоритм определения коэффициента вязкости многолетнемерзлых грунтов прописан в научной литературе. Так определить коэффициент вязкости, возможно испытав многолетнемерзлый грунт методом шарикового штампа [14; 15].

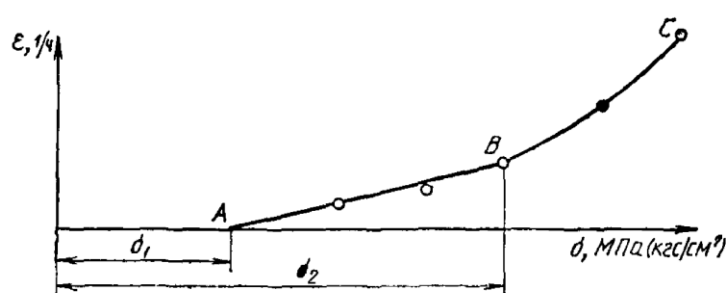


Рисунок 5. Реологическая кривая³

Figure 5. Rheological curve³

Ползучесть грунта тесно связана с коэффициентом вязкости, который зависит от температуры, напряженно-деформированного состояния, времени, изменения структуры в процессе ползучести [14]. Коэффициент вязкости может быть найден путем погружения шарикового штампа в грунт и определения его на основе формулы Стокса, полученной для вязкой жидкости ($\eta_{ст}$) [14]:

$$\eta_{ст} = \frac{(\rho_{ш} - \rho_{гр}) \cdot d}{18 \cdot \dot{S}}, \quad (7)$$

где:

$\rho_{ш}$ — плотность шарика с учетом приложенного груза, г/см³;

$\rho_{гр}$ — плотность грунта, г/см³;

d — диаметр шарика, см;

$\dot{S}$ — постоянная скорость погружения шарика в грунт, см/с.

Однако следует учитывать, что метод шарикового штампа для определения вязкости грунтов следует использовать только в диапазоне шведовой вязкости. Диапазон шведовой вязкости на кривых ползучести соответствует участку установившейся ползучести [14].

Кроме того, коэффициент вязкости можно определить при испытании глинистых грунтов на ползучесть в приборах одноплоскостного среза.⁴

В пособии по проектированию оснований и фундаментов зданий и сооружений⁵ предложена формула для расчета осадки ленточных фундаментов.

Осадка за счет пластического течения льда вычисляется по формуле:

$$S_{\text{л}} = K_{\text{л}} \cdot \tau_{\text{в}} \cdot b \cdot p^2 \cdot \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\bar{\omega}_{i+1} - \bar{\omega}_i}{1 + |t_i|}, \quad (8)$$

где:

$K_{\text{л}}$ — параметр, зависящий от структуры льда, который приближенно рекомендуется принимать как для льда хаотической структуры;

b — ширина подошвы квадратного или ленточного фундамента в см;

p — давление на подошву фундамента в кГ/см²;

n — количество слоев, на которые разделяется лед в зависимости от температуры t ;

$|t_i|$ — температура t -го слоя льда в °С без учета знака;

$\bar{\omega}_i$ и $\bar{\omega}_{i+1}$ — значения безразмерных коэффициентов, определяемые для кровли подошвы i -го слоя льда в зависимости от геометрических размеров фундаментов;

$\tau_{\text{в}}$ — время, в течение которого накапливается деформация ползучести льда, исчисляемое в годах.

Таким образом, в формуле 8 ползучесть основания учитывается при помощи коэффициента $K_{\text{л}}$, который отражает пластические свойства льда.

В нормативной литературе Республики Казахстан⁶ имеется формула для расчета осадки ленточных фундаментов зданий и сооружений. Осадка ползучести определяется по формуле:

$$S = \beta \cdot \sum_{i=1}^n h_i \cdot b_{ki} \cdot \ln \frac{t}{t_e}, \quad (9)$$

⁴ Рекомендации по определению параметров ползучести и консолидации грунтов лабораторными методами / ПНИИИС — М.: Стройиздат, 1989, 64 с. (дата обращения: 12.09.2024).

⁵ Пособие по проектированию оснований и фундаментов зданий и сооружений на вечномерзлых грунтах / НИИОИПС — М.: Стройиздат, 1969, 129 с. (дата обращения: 15.09.2024).

⁶ НТП РК 07-01.4-2012. [Электронный ресурс]. — URL: [https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=32792444] (30.08.2024). (дата обращения: 14.09.2024).

где:

$\beta = 0,8$ — постоянный коэффициент;

h_i — толщина i -го;

b_{ki} — параметр ползучести грунта, который зависит от дополнительного давления (давления от внешней нагрузки) в этом слое и определяется в результате проведения компрессионных испытаний;

t — время определения осадок;

t_e — время окончания фильтрационной (первичной) консолидации.

Таким образом, в данной формуле учет ползучести осуществляется за счет включения безразмерного параметра b_{ki} .

В зарубежных публикациях авторы отмечают важность учета ползучести в расчетах осадок зданий и сооружений. Так, например, в работе [16] представлена следующая формула для расчета осадок зданий и сооружений с учетом ползучести:

$$S = \left(\frac{U}{C'_p} + \frac{1}{C'_s} \cdot \log(t) \right) \cdot \ln \left(\frac{\sigma'_v}{\sigma'_{v,i}} \right), \quad (10)$$

где:

U — коэффициент консолидации;

C'_p — коэффициент первичной консолидации;

C'_s — коэффициент вторичной консолидации;

σ'_v — начальное вертикальное напряжение;

$\sigma'_{v,i}$ — напряжение в i -ом слое.

В данном выражение используется модель Коппиняна. Модель Коппиняна — это модель расчета осадки фундамента, учитывающая ползучесть грунта. Она основана на теории наследственной ползучести Больцмана-Вольтера и позволяет более точно определить осадку фундамента с течением времени [16; 17].

Модель Коппиняна предполагает, что грунт состоит из двух элементов: мгновенного элемента, который деформируется сразу после приложения нагрузки, и вязкоупругого элемента, который деформируется с течением времени под действием напряжения [16; 17].

Преимущество модели Коппиняна в том, что она учитывает ползучесть грунта и дает более точные результаты расчета осадки фундаментов зданий и сооружений. Однако для ее использования необходимо иметь данные о свойствах грунта, которые можно получить только в результате специальных исследований: испытания грунта

методом одноосного сжатия, испытания грунта методом трехосного сжатия и т. д. [16; 17].

В работе [18] представлена следующая формула для расчета осадок оснований зданий с учетом ползучести:

$$S_2 = h_z \cdot C_v \cdot P \cdot \left[1 + \frac{C_a}{C_v} \cdot (1 - e^{-\delta_I \cdot t}) \right], \quad (11)$$

где:

h_z — толщина рассматриваемого слоя грунта;

C_v — коэффициент первичной консолидации грунта;

C_a — коэффициент вторичной консолидации грунта;

P — нагрузка на основание;

t — рассматриваемый промежуток времени.

В статье [19] рассматривается выражение для расчета осадок фундаментов мелкого заложения на глинистых грунтах:

$$\Delta S_c = C_a \cdot H \cdot \log \left(\frac{t_2}{t_1} \right), \quad ()$$

где:

C_a — коэффициент вторичной консолидации;

H — толщина слоя грунта;

t_2, t_1 — рассматриваемые промежутки времени.

Расчет осадки свайного фундамента определяется следующим выражением:

$$\Delta S_p = C_a \cdot H \cdot \log \left(\frac{t_2}{t_1} \right) \cdot f_s, \quad (13)$$

где:

f_s — коэффициент адгезии к свае.

В формулах 10–13 авторы вводили такие параметры как коэффициент первичной и вторичной консолидации.

Первичная консолидация C_v — уплотнение грунта, происходящее за счет отжатия (фильтрации) поровой воды при уменьшении объема пор.

В свою очередь вторичная консолидация C_a — уплотнение грунта, происходящее за счет ползучести несущего каркаса (скелета грунта), обусловленной сдвигами частиц и их водно-коллоидных оболочек [19].

Данные характеристики грунта определяются при испытании грунта в приборе компрессионного сжатия [19; 20].

Коэффициент вторичной консолидации характеризует скорость деформации грунта после завершения первичной консолидации, которая происходит в результате вытеснения воды из пор. Вторичная консолидация (или «ползучесть») представляет собой медленное продолжающееся оседание грунта под постоянной нагрузкой после того, как основная часть избыточного порового давления была рассеяна в ходе первичной консолидации [19; 20].

Алгоритм определения коэффициента вторичной консолидации прописан в нормативной документации.⁷ Согласно данному источнику, талый грунт испытывается методом компрессионного сжатия.

Испытания методом компрессионного сжатия проводятся с помощью компрессионных приборов (одометров), которые исключают боковое расширение образца под действием вертикальной нагрузки.⁷ Данный метод включает как компрессионные, так и консолидационные испытания грунтов. Консолидационные испытания позволяют определить коэффициенты фильтрационной и вторичной консолидации, обозначаемые как C_v и C_α соответственно. На основании этих испытаний получают зависимость деформации грунта от времени под постоянной нагрузкой.⁷

Фиксированное значение ступени напряжений при консолидационных испытаниях определяется программой с учетом эффективного напряжения от собственного веса грунта и нагрузки от конструкции здания или сооружения.⁷

Для испытаний используют образцы грунта ненарушенной структуры с естественной влажностью, принудительно водонасыщенные образцы или образцы нарушенного сложения с заданными значениями плотности и влажности. Образец грунта должен быть иметь форму цилиндра диаметром не менее 70 мм, при этом отношение диаметра к высоте должно быть от 2,8 до 3,5. Максимальный размер фракций грунта в образце не должен превышать 1/5 высоты образца.⁷

Испытания на консолидацию проводят путем приложения к образцу вертикальной нагрузки в условиях сжатия с открытым дренажем. Нагрузка на образец при консолидации прикладывается одновременно в одну ступень.⁷

Для определения коэффициента вторичной консолидации C_α испытание продолжают до тех пор, пока кривая консолидации не выйдет на прямолинейный участок вторичного сжатия, для чего необходимо не менее трех точек измерения на этом участке.⁷

⁷ ГОСТ 12248.4-2020. Грунты. Определение характеристик деформируемости методом компрессионного сжатия. — М.: Стандартинформ, 2020. — 15 с. — Текст: непосредственный. (дата обращения: 12.09.2024).

Для расчета значений коэффициентов C_v и C_α используют логарифмический метод, строя кривую консолидации в координатах: относительная деформация ε (по оси ординат) и время t , мин, отложенное в логарифмическом масштабе (по оси абсцисс) (рис. 6).⁷

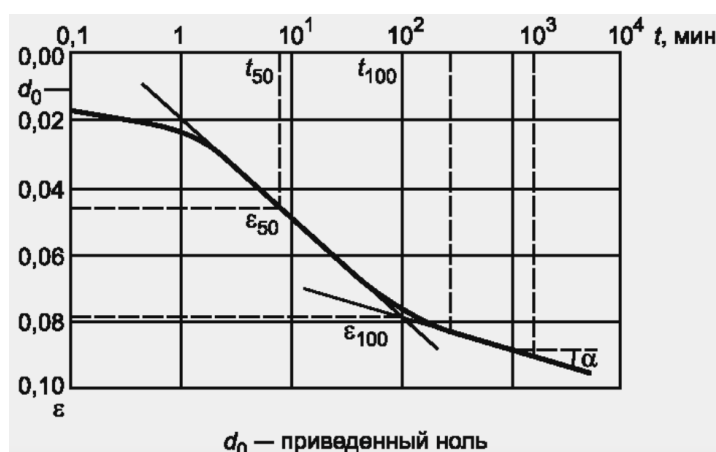


Рисунок 6. График обработки кривой консолидации логарифмическим методом⁷

Figure 6. Graph of consolidation curve processing using the logarithmic method⁷

На кривой консолидации (рис. 6) необходимо определить величину относительной деформации, соответствующей нулевому первичному сжатию (откорректированный ноль компрессии d_0). Для этого на начальном участке графика выбирают точки с абсциссами 0,1 и 0,4. Разность ординат этих точек, отложенных выше начальной точки графика, определяет исправленный ноль d_0 .⁷

Для нахождения деформации, соответствующей 100 % фильтрационного сжатия при заданной нагрузке, проводят две касательных: одну в самую крутую часть графика (в точку перегиба), другую в конечный линейный участок кривой. Точка пересечения этих касательных указывает на 100 % первичное сжатие грунта. Деформации, возникающие после достижения 100 % первичного сжатия, относят к вторичному сжатию, вызванному ползучестью.⁷

Коэффициент вторичной консолидации C_α (безразмерная величина) определяется тангенсом угла α между линейным участком кривой на стадии вторичной консолидации и линией, параллельной оси абсцисс (рис. 6). Коэффициент вторичной консолидации C_α определяется по формуле⁷:

$$C_\alpha = \operatorname{tg}(\alpha) = \frac{\varepsilon(t_2) - \varepsilon(t_1)}{\lg(t_2) - \lg(t_1)}, \quad (14)$$

где:

$\varepsilon(t_1)$ и $\varepsilon(t_2)$ — значения деформации образца на участке вторичной консолидации;

t_1 и t_2 — время, соответствующее деформациям $\varepsilon(t_1)$ и $\varepsilon(t_2)$, мин.

Таким образом, ползучесть грунтов при расчетах осадки фундаментов, может быть учтена в виде функции ползучести и коэффициента вязкости, либо коэффициента вторичной консолидации, в зависимости от применяемой расчетной модели грунта.

Заключение

Conclusion

1. Учет ползучести грунтов, при расчетах осадок зданий и сооружений, является актуальной задачей как для талых, так и для мерзлых грунтов основания.

2. Существующие нормативные документы российских и зарубежных норм имеют схожие подходы по учёту ползучести грунтов, используя в качестве исходных параметров кривые ползучести, реологические кривые, либо отдельные параметры грунтов в виде коэффициентов вязкости и вторичной консолидации.

3. В настоящее время существуют различные методики получения параметров ползучести грунтов, использование которых может приводить к разбросу получаемых значений, что указывает на необходимость апробации данных методов для конкретных грунтовых условий территории.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Melnikov, R.** OCR and POP Parameters in Plaxis-based Numerical Analysis of Loaded over Consolidated Soils / R. Melnikov, J. Zazulya, M. Stepanov, O. Ashikhmin, T. Maltseva. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.783> // Procedia Engineering. — 2016. — Т 165. — С. 845–852. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816341443>. (дата обращения: 22.08.2024).
2. **Осипов, В.И.** Реологические свойства глинистых грунтов / В.И. Осипов, Ф.С. Карпенко, Р.Г. Кальбергенов [и др.] // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. — 2017. — № 6. — С. 41–51. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30496176>. — EDN ZRJAWL. (дата обращения: 22.08.2024).
3. **Жакулина, А.А.** Выбор грунтовой модели для затухающей ползучести и методы их описания / А.А. Жакулина, А.С. Жакулин // Вестник Карагандинского университета. — 2016. — № 2. — С. 70–73. — URL: <https://rep.ksu.kz/bitstream/handle/data/2016/A.A.%20Zhakulina,%20A.S.%20Zhakulin.pdf?sequence=3>. (дата обращения: 22.08.2024).
4. **Мальцева, Т.В.** Моделирование двухфазного тела с учетом несущей способности жидкой фазы / Т.В. Мальцева, Е.Р. Трефилина // Математическое моделирование. — 2004. — Т 16. — № 11. — С. 47–57. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32204259>. — EDN YKGOYC. (дата обращения: 22.08.2024).
5. **Степанов, М.А.** Устранение прогрессирующего развития неравномерности осадок многоэтажного жилого дома на ленточных свайных фундаментах / М.А. Степанов, Т.В. Мальцева, А.Н. Краев [и др.] // Интернет-журнал «Науковедение». — 2017. — Т 9. — № 4. — С. 62TVN417. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30080003>. (дата обращения: 22.08.2024).

6. **Роман, Л.Т.** Модуль деформации мерзлых грунтов при компрессионных испытаниях / Л. Т. Роман, П.И. Котов, М.Н. Царапов // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 2016. — № 5. — С. 35–40. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27384983>. — EDN XBGXHT. (дата обращения: 29.08.2024).
7. **Роман, Л.Т.** Механика мерзлых грунтов на пороге XXI века / Л.Т. Роман // Криосфера Земли. — 2002. — Т VI. — № 1. — С. 3–16. — URL: https://earthcryosphere.ru/archive/2002_1/EC_1_2002_3-16.pdf. (дата обращения: 29.08.2024).
8. **Lancellotta, R.** Stability problems of leaning towers on weak soil / R. Lancellotta. — DOI <https://doi.org/10.1201/b14965> // Geotechnics and Heritage / Лондон: Taylor & Francis Group, 2013. — С. 195–207. — URL: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/b14965-11/stability-problems-leaning-towers-weak-soil-lancellotta>. (дата обращения: 29.08.2024).
9. **Baraccani, S.** The Dynamic Properties of The Asinelli Tower in Bologna / S. Baraccani, T. Trombetti, M. Palermo, S. Silvestri, G. Gasparini // 9th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions / Мехико-Сити: Mexican Society of Structural Engineering, 2014. — URL: <https://cris.unibo.it/handle/11585/362126>. (дата обращения: 29.08.2024).
10. **Dallavalle, G.** The Garisenda Tower in Bologna: Effects of degradation of selenite basement on its static behaviour / G. Dallavalle, A. Di Tommaso, G. Gottardi, T. Trombetti, R. Lancellotta, S. Lugli. — DOI <https://doi.org/10.1201/9781003308867> // Geotechnical Engineering for the Preservation of Monuments and Historic Sites III / Лондон: CRC Press, 2022. — С. 1088–1100. — URL: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/oa-edit/10.1201/9781003308867-86/garisenda-tower-bologna-effects-degradation-selenite-basement-static-behaviour-dallavalle-di-tommaso-gottardi-trombetti-lancellotta-lugli>. (дата обращения: 29.08.2024).
11. **Puzrin, A.M.** Bearing Capacity Failure: Transcona Grain Elevator, Canada / A.M. Puzrin, E.E. Alonso, N.M. Pinyol. — DOI https://doi.org/10.1007/978-90-481-3531-8_4 // Geomechanics of Failures / Дордрехт: Springer, 2010. — С. 67–84. — URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-90-481-3531-8_4. (дата обращения: 29.08.2024).
12. **Kaczmarek, L.** Contemporary overview of soil creep phenomenon / L. Kaczmarek, P. Dobak. — DOI <http://dx.doi.org/10.1515/ctg-2017-0003> // Contemporary Trends in Geoscience. — 2017. — № 6. — С. 28–40. — URL: <http://archive.sciendo.com/CTG/ctg.2017.6.issue-1/ctg-2017-0003/ctg-2017-0003.pdf>. (дата обращения: 29.08.2024).
13. **Мальцева, Т.В.** Расчет деформированного состояния вязкоупругого водонасыщенного основания / Т.В. Мальцева, А.В. Набоков, В.В. Воронцов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. — 2010. — № 4. — С. 94–99. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16339146>. — EDN NTONIX. (дата обращения: 29.08.2024).
14. **Роман, Л.Т.** Определение вязкости мерзлых грунтов шариковым штампом / Л.Т. Роман, П.И. Котов // Криосфера Земли. — 2013. — Т 17. — № 4. — С. 30–35. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20678436>. — EDN RKNEAP. (дата обращения: 29.08.2024).
15. **Старовойтов, С.И.** Исследование вязкости среднесуглинистой почвы / С. И. Старовойтов, Н.П. Старовойтова, Н.Н. Чемисов // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина". — 2011. — № 2. — С. 55–56. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20231285>. — EDN RASTJL. (дата обращения: 29.08.2024).
16. **Van Baars, S.** Soft Soil Creep Modelling of Large Settlements / S. van Baars // 2nd International Conference on Advances in Soft Soil Engineering and Technology 2–4 July 2003, Putrajaya, Malaysia / Селангор: Universiti Putra Malaysia Press, 2003. — С. 361–371. — URL: https://www.researchgate.net/publication/237657988_SOFT_SOIL_CREEP_MODELING_OF_LARGE_SETTLEMENTS. (дата обращения: 29.08.2024).
17. **Madurapperuma, M.** Numerical implementation of a constitutive model for soil creep / M. Madurapperuma, A. Puswewala // Journal of Mechanics of Materials and Structures. — 2008. — № 10. — С. 1857–1874. — URL: <https://msp.org/jomms/2008/3-10/jomms-v3-n10-p05-p.pdf>. (дата обращения: 12.09.2024).
18. **Zhakulin, A.** Determining quasi-single-phase soil system settlements taking into account their creep / A. Zhakulin, P. Kropachev, A. Zhakulina, V. Nefedov, A. Tungatarov, N. Popov. — DOI <https://doi.org/10.31618/ESU.2413-9335.2020.3.74.745> // Евразийский Союз Ученых. — Т 74. — № 3. — С. 29–34. — URL: <https://euroasia-science.ru/tehnicheskije-nauki/determining-quasi-single-phase-soil-system-settlements-taking-into-account-their-creep-29-34/>. (дата обращения: 29.08.2024).

19. **Bartlett, S.** Evaluation of Secondary Consolidation Settlement Associated with Embankment Construction for Fast-paced Transportation Projects / S. Bartlett, E. Lawton, Z. Gibbs. — Солт-Лейк-Сити: Department of Civil and Environmental Engineering University of Utah, 2020. — 472 с. — URL: <https://www.ugpti.org/resources/reports/downloads/mpc20-422.pdf> (дата обращения: 29.08.2024).
20. **Любимова, Т.В.** Особенности первичной и вторичной консолидации заторфованных грунтов / Т.В. Любимова, Н.А. Бондаренко // Геология, география и глобальная энергия. — 2018. — № 4. — С. 125–130. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36683870>. — EDN EQKHFJ. (дата обращения: 12.09.2024).

Сведения об авторах:

Гультияев Роман Сергеевич — инженер-исследователь, ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия, e-mail: qetuo1951@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4468-4312>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1229824

Стаселько Егор Леонидович — ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия, e-mail: egorstaselko@inbox.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4981-9179>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1246205

Анфиногенов Виталий Андреевич — инженер-исследователь, ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия, e-mail: anfinogenovv_72@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0640-2454>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1257445

Краев Андрей Николаевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные конструкции», ведущий научный сотрудник, ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия, e-mail: kraev-an@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5679-2084>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=761631

Статья получена: 03.09.2024. Принята к публикации: 15.10.2024. Опубликовано онлайн: 20.12.2024.

REFERENCES

1. Melnikov R., Zazulya J., Stepanov M., Ashikhmin O., Maltseva T. OCR and POP Parameters in Plaxis-based Numerical Analysis of Loaded over Consolidated Soils. *Procedia Engineering*. 2016;165: 845–852. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.783>.
2. Osipov V.I., Karpenko F.S., Kalbergenov R.G., Kutergin V.N., Rumyantseva N.A. Rheological Properties of The Clay Soils. *Geokologiya. Inzheneraya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*. 2017;(6): 41–51. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30496176> (accessed 22nd August 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
3. Zhakulina A.A., Zhakulin A.S. The ground foundations model for an attenuation creep and methods of their description. *Bulletin of the Karaganda university*. 2016;(2): 70–73. Available at: <https://rep.ksu.kz/bitstream/handle/data/2016/A.A.%20Zhakulina,%20A.S.%20Zhakulin.pdf?sequence=3> (accessed 22nd August 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
4. Maltseva T.V., Trefilina E.R. Modeling of The Two-Phase Body with Account of Carrying Abilities of The Fluid Phase. *Mathematical Models and Computer Simulations*. 2004;16(11): 47–57. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32204259> (accessed 22nd August 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
5. Stepanov M.A., Maltseva T.V., Kraev A.N., Bartholomew L.A., Karaulov A.M. Elimination of the Progressive Development of Uneven Sedimentation of a Multi-Storey Residential House on Tape Pile Foundations. *Naukovedenie*. 2017;9(4): 62TVN417. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30080003> (accessed 22nd August 2024). (In Russ., abstract in Eng.).

6. Roman L.T., Kotov P.I., Tsarapov M.N. Deformation Modulus of Frozen Ground in Compression Tests. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2016;53(5): 357–363. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s11204-016-9411-7>.
7. Roman L.T. Mechanics of Frozen Soils on The Threshold of XXI Century. *Kriosfera Zemli*. 2002;VI(1): 3–16. Available at: https://earthcryosphere.ru/archive/2002_1/EC_1_2002_3-16.pdf (accessed 29th August 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
8. Lancellotta R. Stability problems of leaning towers on weak soil. In: *Geotechnics and Heritage*. London: Taylor & Francis Group; 2013. p. 195–207. Available at: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/b14965-11/stability-problems-leaning-towers-weak-soil-lancellotta> (accessed 29th August 2024). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1201/b14965>.
9. Baraccani S., Trombetti T., Palermo M., Silvestri S., Gasparini G. The Dynamic Properties of The Asinelli Tower in Bologna. In: *9th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions*. Mexico City: Mexican Society of Structural Engineering; 2014. Available at: <https://cris.unibo.it/handle/11585/362126> (accessed 29th August 2024). (In Eng.).
10. Dallavalle G., Di Tommaso A., Gottardi G., Trombetti T., Lancellotta R., Lugli S. The Garisenda Tower in Bologna: Effects of degradation of selenite basement on its static behaviour. In: *Geotechnical Engineering for the Preservation of Monuments and Historic Sites III*. London: CRC Press; 2022. p. 1088–1100. Available at: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/oa-edit/10.1201/9781003308867-86/garisenda-tower-bologna-effects-degradation-selenite-basement-static-behaviour-dallavalle-di-tommaso-gottardi-trombetti-lancellotta-lugli> (accessed 29th August 2024). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003308867>.
11. Puzrin A.M., Alonso E.E., Pinyol N.M. Bearing Capacity Failure: Transcona Grain Elevator, Canada. In: *Geomechanics of Failures*. Dordrecht: Springer; 2010. p. 67–84. Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-90-481-3531-8_4 (accessed 29th August 2024). (In Eng.) DOI: https://doi.org/10.1007/978-90-481-3531-8_4.
12. Kaczmarek L., Dobak P. Contemporary overview of soil creep phenomenon. *Contemporary Trends in Geoscience*. 2017;(6): 28–40. (In Eng.) DOI: <http://dx.doi.org/10.1515/ctg-2017-0003>.
13. Maltseva T.V., Nabokov A.V., Vorontsov V.V., Krizhanivskaya T.V., Minaeva A.V. Calculation of deformed condition of viscoelastic water-saturated foundation. *Oil and Gas Studies*. 2010;(4): 94–99. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16339146> (accessed 29th August 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
14. Roman L.T., Kotov P.I. Determination of Frozen Ground Viscosity by Sphere Punch. *Kriosfera Zemli*. 2013;17(4): 30–35. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20678436> (accessed 29th August 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
15. Starovoitov S.I., Starovoitova N.P., Chemisov N.N. Determining Medium Loamy Soil Viscosity. *Vestnik of Federal State Educational Establishment of Higher Professional Education "Moscow State Agroengineering University Named After V.P. Goryachkin"*. 2011;(2): 55–56. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20231285> (accessed 29th August 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
16. Van Baars S. Soft Soil Creep Modelling of Large Settlements. In: *2nd International Conference on Advances in Soft Soil Engineering and Technology 2–4 July 2003, Putrajaya, Malaysia*. Selangor: Universiti Putra Malaysia Press; 2003. p. 361–371. Available at: https://www.researchgate.net/publication/237657988_SOFT_SOIL_CREEP_MODELING_OF_LARGE_SETTLEMENTS (accessed 29th August 2024). (In Eng.).
17. Madurapperuma M., Puswewala A. Numerical implementation of a constitutive model for soil creep. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*. 2008;(10): 1857–1874. Available at: <https://msp.org/jomms/2008/3-10/jomms-v3-n10-p05-p.pdf> (accessed 12th September 2024). (In Eng.).
18. Zhakulin A., Kropachev P., Zhakulina A., Nefedov V., Tungatarov A., Popov N. Determining quasi-single-phase soil system settlements taking into account their creep. *Eurasian Union of Scientists*. 2020;74(3): 29–34. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.31618/ESU.2413-9335.2020.3.74.745>.
19. Bartlett, S. Evaluation of Secondary Consolidation Settlement Associated with Embankment Construction for Fast-paced Transportation Projects / S. Bartlett, E. Lawton, Z. Gibbs. — Солт-Лейк-Сити: Department of Civil and Environmental Engineering University of Utah, 2020. — 472 c. — URL: <https://www.ugpti.org/resources/reports/downloads/mpc20-422.pdf> (accessed 29th August 2024). (In Eng.).

20. Lyubimova T.V., Bondarenko N.A. Features of Primary and Secondary Consolidation of Peaty Soil. *Geology, Geography and Global Energy*. 2018;(4): 125–130. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36683870> (accessed 29th August 2024). (In Russ., abstract in Eng.).

Information about the authors:

Roman S. Gulyaev — Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia, e-mail: getuo1951@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4468-4312>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1229824

Egor L. Staselko — Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia, e-mail: egorstaselko@inbox.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4981-9179>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1246205

Vitaliy A. Anfinogenov — Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia,
e-mail: anfinogenovv_72@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0640-2454>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1257445

Andrey N. Kraev — Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia, e-mail: kraev-an@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5679-2084>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=761631

Submitted: 3rd September 2024. Revised: 15th October 2024. Published online: 20th December 2024.