

УДК 691.335

Тип статьи: научная статья

ГРНТИ 67.09.35

Научная специальность ВАК: 2.1.05 Строительные материалы и изделия (технические науки)

EDN dbmiob

DOI 10.62980/2076-0655-2025-106-114

РАСЧЁТ ДЕФОРМАЦИЙ ГЛИНИСТЫХ ОСНОВАНИЙ И ВОЗМОЖНОСТЬ ИХ СТАБИЛИЗАЦИИ ЦЕМЕНТНО-СИЛИКАТНОЙ КОМПОЗИЦИЕЙ, МОДИФИЦИРОВАННОЙ КЕРАМЗИТОВОЙ ПЫЛЬЮ

Князева С.А.¹, Яковлев Г.И.¹, Лисин В.А.¹, Гилячев И.В.¹, Бурьянов А.Ф.²

¹Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова

²Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

АННОТАЦИЯ

Деформации фундаментов зданий на глинистых грунтах могут развиваться в течение длительных промежутков времени, измеряемых столетиями, вызывая осадку здания. Скорость протекания осадок оказывает влияние на возникновение пластических деформаций материала стен и каркаса. Поэтому развитие методик расчёта деформаций оснований во времени является актуальной задачей. Известно, что теория фильтрационной консолидации даёт сходные с практическими наблюдениями результаты лишь для слабых водонасыщенных глинистых грунтов текучей и текуче-пластичной консистенции, которые зачастую требуют усиления. В таких случаях применяют технологию струйной цементации или пропиточной инъекции. Для этого применяются инъекционные смеси на основе микроцементов. В работе предлагаются составы инъекционных смесей с использованием керамзитовой пыли. Показано, что керамзитовая пыль может использоваться в качестве активной минеральной добавки в инъекционных композициях на основе микроцементов. Установлено, что инъекционные составы на основе микроцемента, модифицированные керамзитовой пылью имеют лучшую эффективность при закреплении глинистых грунтов, так как размеры их частиц сопоставимы с размерами частиц микроцементов и керамзитовой пыли.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *фильтрационная консолидация, начальный градиент напора, закрепление грунтов, керамзитовая пыль, микроцемент*

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Князева С.А., Яковлев Г.И., Лисин В.А., Гилячев И.В., Бурьянов А.Ф. Расчёт деформаций глинистых оснований и возможность их стабилизации цементно-силикатной композицией, модифицированной керамзитовой пылью // Техника и технология силикатов. – 2025. – Т. 32, № 2. – С. 106-114. DOI 10.62980/2076-0655-2025-106-114, EDN dbmiob

Type of article - scientific article

OECD 2.01 Civil engineering

FA CONSTRUCTION & BUILDING TECHNOLOGY

EDN dbmiob

DOI 10.62980/2076-0655-2025-106-114

CALCULATION OF DEFORMATIONS OF CLAY FOUNDATIONS AND THE POSSIBILITY OF THEIR STABILIZATION WITH CEMENT-SILICATE COMPOSITION, MODIFIED WITH EXPANDED CLAY DUST

Knyazeva S.A.¹, Yakovlev G.I.¹, Lysin V.A.¹, Gilyachev I.V.¹, Burianov A.F.²

¹Kalashnikov Izhevsk State Technical University

²Moscow State University of Civil Engineering (MGSU) National Research University.

ABSTRACT

The deformations of building foundations on clay soils can develop over long periods of time, measured in centuries, causing building settlement. The rate of settlement influences the occurrence of plastic deformations of wall and frame material. Therefore, the development of methods for calculation of foundation deformations in time is an urgent task. It is known that the theory of filtration consolidation gives similar results to practical observations only for weak water-saturated clayey soils of fluid and fluid-plastic consistency, which often require reinforcement. In such cases, jet grouting or impregnation injection technology is used. Injection mixtures based on microcements are used for this purpose. The paper proposes compositions of injection mixtures using expanded clay dust. It is shown that expanded clay dust can be used as an active mineral additive in the injection compositions based on the microcements. It is established that the injection compositions on the basis of the microcement modified with the expanded clay dust have the best efficiency at fixing clay soils, as the sizes of their particles are comparable with the sizes of the particles of the microcements and the expanded clay dust.

KEY WORDS: *filtration consolidation, initial head gradient, soil consolidation, expanded clay dust, microcement*

FOR CITATION: Knyazeva S.A., Yakovlev G.I., Lysin V.A., Gilyachev I.V., Burianov A.F. Calculation of deformations of clay foundations and possibility of their stabilization by cement-silicate composition modified with expanded clay dust // Technique and technology of silicates. – 2025. Vol. – 32, No2. – Pp. 106 – 114. DOI 10.62980/2076-0655-2025-106-114, EDN dbmiob

ВВЕДЕНИЕ

При производстве керамзитового гравия на крупных заводах ежедневно образуется до 7-8 т основного отхода - керамзитовой пыли, удаляемой в отвалы, которые занимают огромные площади на полигонах хранения [1, 2]. Минералогический анализ керамзитовой пыли показал присутствие в ней дегидратированной глины, кремнезёма аморфной структуры, оксида и карбоната кальция [3]. Традиционно, отходы, в составе которых присутствует большое количество кремнезёма аморфной структуры и дегидратированной глины, используют в качестве активных минеральных добавок в цементы для модификации их свойств и в композициях на основе микроцементов, используемых для стабилизации деформаций грунтовых оснований и усиления оснований фундаментов.

Наблюдения за деформациями фундаментов зданий на глинистых грунтах показывают, что в некоторых случаях они развиваются в течение длительных промежутков времени, измеряемых столетиями. Как известно, для зданий и сооружений важна не столько абсолютная величина осадки, сколько скорость её протекания, неравномерность в отдельных точках сооружения, а также время её стабилизации. Скорость протекания осадок оказывает влияние на возникновение пластических деформаций материала стен и каркаса. При этом, поскольку конструкции зданий обладают различной способностью перераспределения усилий, при больших скоростях развития неравномерных осадок они могут привести к развитию трещин в стенах (рис. 1).

РИСУНОК 1

ОБРАЗОВАНИЕ ТРЕЩИН ПОД ОКОННЫМИ ПРОЁМАМИ ВСЛЕДСТВИЕ НЕРАВНОМЕРНЫХ ОСАДОК КИРПИЧНОГО ЗДАНИЯ

Figure 1

Cracks under window openings due to uneven settlement of brick building



В настоящее время в нормативных документах проектирования оснований зданий и сооружений для определения их конечных осадок используется достаточно универсальный метод послойного суммирования, основанный на линейно-деформируемой модели грунтового основания. Данный метод расчёта требует определения сжимаемой толщи основания, нижняя граница которой принимается исходя из соотношения напряжений от внешней дополнительной нагрузки и собственного веса грунта. Однако этот способ позволяет получить лишь конечные осадки основания, соответствующих стадии их стабилизации и не учитывает некоторые физические особенности грунта, такие как структурную прочность, начальный градиент напора и т.д.

Расчёт деформаций оснований во времени начался со становления теории фильтрационной консолидации, предложенной К. Терцаги (1925г.), который впервые сформулировал и решил одномерную задачу уплотнения

INTRODUCTION

During the production of expanded clay gravel at large plants, up to 7-8 tons of the main waste - expanded clay dust - are generated daily, which is removed to dumps that occupy huge areas at storage sites [1, 2]. Mineralogical analysis of expanded clay dust showed the presence of dehydrated clay, amorphous silica, calcium oxide and carbonate [3]. Traditionally, waste containing a large amount of amorphous silica and dehydrated clay is used as active mineral additives in cements to modify their properties and in microcement-based compositions used to stabilize soil deformations and strengthen foundation bases.

Observations of deformations of building foundations on clay soils show that in some cases they develop over long periods of time, measured in centuries. As is known, for buildings and structures, it is not so much the absolute value of settlement that is important, but the speed of its occurrence, unevenness at individual points of the structure, as well as the time of its stabilization. The rate of sediment flow affects the occurrence of plastic deformations of the wall and frame material. Moreover, since building structures have different capacities for redistributing forces, at high rates of development of uneven settlements they can lead to the development of cracks in the walls (Fig. 1).

Currently, in regulatory documents for the design of foundations of buildings and structures, a fairly universal method of layer-by-layer summation based on a linearly deformable model of the soil foundation is used to determine their final settlements. This calculation method requires determining the compressible thickness of the foundation, the lower limit of which is taken based on the ratio of stresses from the external additional load and the soil's own weight. This calculation method requires determining the compressible thickness of the foundation, the lower limit of which is taken based on the ratio of stresses from the external additional load and the soil's own weight. However, this method allows obtaining only the final foundation settlements corresponding to the stage of their stabilization and does not take into account some physical characteristics of the soil, such as structural strength, initial pressure gradient, etc.

The calculation of foundation deformations over time

водонасыщенного глинистого грунта в виде слоя конечной толщины.

В дальнейшем теория фильтрационной консолидации была развита в работах Н.М. Герсеванова (1934), Н.А. Цытовича (1934), В.А. Флорина (1948-1951), Д.Е. Польшина (1948), С.А. Роза (1950), Рендулика (1935-1937), Карилло (1942), М. Био (1941-1956), Т. Менделя (1953) и других.

Сложный характер процессов при уплотнении, зависящий не только от внешних факторов, но и природы прочности и деформируемости грунтов, вызвал необходимость введения дополнительных параметров в теорию фильтрационной консолидации. Так в 1935 г. К.П. Лундин столкнулся с явлением начального градиента напора при фильтрации через уплотнённые торфы и плотные глины (полутвёрдой и твёрдой консистенции). В дальнейшем подобное явление было обнаружено в исследованиях С.А. Роза, Б.Ф. Рельтова, М.Ю. Абелева, Б.В. Дерягина, Н.Ф. Бондаренко, Р.С. Зиангирова и др.

Современные решения одномерной задачи фильтрационной консолидации с учетом начального градиента напора выполняются аналитическим и численными методами [4, 5]. В качестве численных методов решения задачи используются метод конечных разностей и метод конечных элементов. Суть простейшего аналитического метода заключается в определении максимальной глубины зоны фильтрации из условия равенства фактического и начального градиентов напора. Конечную осадку определяют, принимая треугольную или трапециевидную эпюры распределения эффективных напряжений. Осадку в момент времени t определяют как долю от конечной осадки, используя степень консолидации грунта.

В работе [6] приводится методика решения задачи фильтрационной консолидации с учётом начального градиента напора, который позволяет определить не только скорость развития осадки основания во времени, но и определить время окончания деформаций, учесть изменение сжимаемой толщи по глубине.

При решении задачи, согласно данной методике, вводятся те же допущения, что и при «классическом» решении задачи фильтрационной консолидации:

- 1) рассматривается полностью водонасыщенный грунт со свободной несжимаемой водой в порах грунта;
- 2) не учитывается ползучесть грунта, в качестве уравнения связи между напряжениями и деформациями используется линейная компрессионная зависимость;
- 3) грунт не обладает структурной прочностью;
- 4) к поверхности грунта прикладывается мгновенно-постоянная сплошная равномерно распределенная нагрузка;
- 5) фильтрация воды происходит лишь в зоне, в которой действующий градиент напора больше начального;
- 6) изменчивостью водопроницаемости в процессе уплотнения можно пренебречь.

Уравнение консолидации в одномерной постановке задачи имеет вид (1):

$$\frac{\partial H}{\partial t} = c \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} \quad (1)$$

где H – функция напора; t – время; c – коэффициент консолидации грунта, $c = k/(m_v \gamma_w)$, m_v – коэффициент

начал с развития теории фильтрационной консолидации предложенной К. Терзаги (1925), который впервые сформулировал и решил одномерную задачу уплотнения водонасыщенного глинистого грунта в виде слоя конечной толщины.

Позднее теория фильтрационной консолидации была развита в работах Н.М. Герсеванова (1934), Н.А. Цытовича (1934), В.А. Флорина (1948-1951), Д.Е. Польшина (1948), С.А. Роза (1950), Рендулика (1935-1937), Карилло (1942), М. Био (1941-1956), Т. Менделя (1953) и других.

Сложный характер процессов при уплотнении, зависящий не только от внешних факторов, но и природы прочности и деформируемости грунтов, вызвал необходимость введения дополнительных параметров в теорию фильтрационной консолидации. Так в 1935 г. К.П. Лундин столкнулся с явлением начального градиента напора при фильтрации через уплотнённые торфы и плотные глины (полутвёрдой и твёрдой консистенции). В дальнейшем подобное явление было обнаружено в исследованиях С.А. Роза, Б.Ф. Рельтова, М.Ю. Абелева, Б.В. Дерягина, Н.Ф. Бондаренко, Р.С. Зиангирова, и др.

Современные решения одномерной задачи фильтрационной консолидации с учетом начального градиента напора выполняются аналитическим и численными методами [4, 5]. В качестве численных методов решения задачи используются метод конечных разностей и метод конечных элементов. Суть простейшего аналитического метода заключается в определении максимальной глубины зоны фильтрации из условия равенства фактического и начального градиентов напора. Конечную осадку определяют, принимая треугольную или трапециевидную эпюры распределения эффективных напряжений. Осадку в момент времени t определяют как долю от конечной осадки, используя степень консолидации грунта.

В работе [6] приводится методика решения задачи фильтрационной консолидации с учётом начального градиента напора, который позволяет определить не только скорость развития осадки основания во времени, но и определить время окончания деформаций, учесть изменение сжимаемой толщи по глубине.

При решении задачи, согласно данной методике, вводятся те же допущения, что и при «классическом» решении задачи фильтрационной консолидации:

- 1)fully water-saturated soil with free incompressible water in the soil pores is considered;
- 2)soil creep is not taken into account; a linear compression relationship is used as the equation for the relationship between stresses and deformations;
- 3)the soil does not have structural strength;
- 4)an instantaneous, continuous, uniformly distributed load is applied to the soil surface;
- 5)water filtration occurs only in the zone in which the current pressure gradient is greater than the initial one;
- 6)the variability of water permeability during the compaction process can be neglected.

Уравнение консолидации в одномерной постановке задачи имеет вид (1):

$$\frac{\partial H}{\partial t} = c \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} \quad (1)$$

где H – функция напора; t – время; c – коэффициент консолидации грунта, $c = k/(m_v \gamma_w)$, m_v – коэффициент

относительной сжимаемости, γ_w – удельный вес воды; z – координата точки.

Аналитическое решение уравнения (1) для случая одномерного уплотнения слоя грунта с нижней водонепроницаемой и верхней водопроницаемой граничной поверхностью под действием постоянной мгновенно приложенной нагрузки получено в виде разложения в ряд Фурье. На практике обычно ограничиваются первым членом ряда (2):

$$H = \frac{4p}{\gamma_w \pi} \sin \frac{\pi z}{2h} e^{-N} \quad (2)$$

На рис. 2 показана эпюра распределения напора по глубине в различные моменты времени, построенная согласно формуле (2), из которого видно, что напор уменьшается со временем и увеличивается с глубиной.

РИСУНОК 2

ЭПЮРА ФУНКЦИИ НАПОРА В РАЗЛИЧНЫЕ МОМЕНТЫ ВРЕМЕНИ

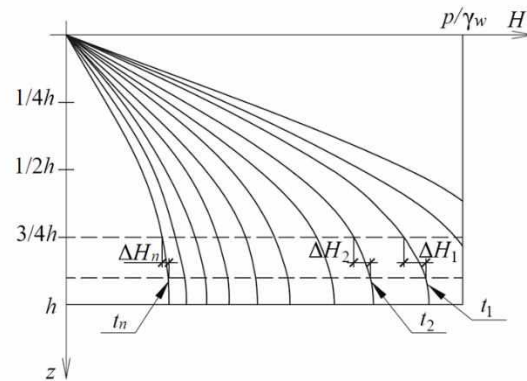
Figure 2

Diagram of the pressure function at different moments in time

compressibility coefficient, γ_w is the specific gravity of water; z is the point coordinate.

The analytical solution of equation (1) for the case of one-dimensional compaction of a soil layer with a lower impermeable and upper permeable boundary surface under the action of a constant instantly applied load is obtained in the form of a Fourier series expansion. In practice, we usually limit ourselves to the first member of the series (2):

Fig. 2 shows a diagram of the distribution of pressure by depth at different moments in time, constructed according to formula (2), from which it is evident that the pressure decreases with time and increases with depth.



Если произвольно выбрать две горизонтальные плоскости на графике, можно заметить, что разность напоров между ними непостоянна ($\Delta H_1 \neq \Delta H_2 \neq \dots \neq \Delta H_n$), следовательно, и градиент напора между ними также непостоянен. Так как с физической точки зрения градиент напора – это приращение напора к толщине слоя, то в любой момент времени в любой точке слоя его можно найти, продифференцировав уравнение (2) по координате z , получим уравнение (3):

$$i = \frac{2p}{\gamma_w h} \cos \frac{\pi z}{2h} e^{-N} \quad (3)$$

На рис. 3 показана зависимость градиента напора от координаты в различные моменты времени. Из графиков видно, что действующий градиент напора уменьшается как во времени, так и по глубине. По этим зависимостям можно графически определить толщину сжимаемой толщи в момент времени t_n , получив точку пересечения функции градиента напора и прямой i_0 . Ордината точки равна сжимаемой толще.

Ордината точки пересечения графиков в различные моменты времени принимает различные значения, следовательно, поверхность раздела, разделяющая области, в которых действующий градиент больше или меньше начального, смещается во времени, и сжимаемая толща является величиной переменной.

Для того чтобы определить время завершения фильтрационной консолидации, необходимо найти такую функцию градиента напора из всего семейства кривых, которая пересекает прямую $i = i_0$ в точке с координатой $z=0$ (рис. 4). Для этого в выражение (3) подставим вместо

If we arbitrarily select two horizontal planes on the graph, we can see that the difference in pressure between them is not constant ($\Delta H_1 \neq \Delta H_2 \neq \dots \neq \Delta H_n$), and therefore the pressure gradient between them is also not constant. Since from a physical point of view the pressure gradient is an increment of pressure to the thickness of the layer, then at any moment in time at any point in the layer it can be found by differentiating equation (2) with respect to the z coordinate, we obtain equation (3):

Fig. 3 shows the dependence of the pressure gradient on the coordinate at different moments in time. From the graphs it is clear that the effective pressure gradient decreases both with time and with depth. Using these dependencies, it is possible to graphically determine the thickness of the compressible layer at time t_n , obtaining the intersection point of the pressure gradient function and the straight line i_0 . The ordinate of the point is equal to the compressible thickness.

The ordinate of the intersection point of the graphs takes on different values at different moments in time; therefore, the interface separating the regions in which the current gradient is greater or less than the initial one shifts in time, and the compressible thickness is a variable quantity.

In order to determine the completion time of filtration consolidation, it is necessary to find such a pressure gradient function from the entire family of curves that intersects the line $i = i_0$ at a point with coordinate $z=0$ (Fig. 4). To do this, we substitute the initial gradient i_0 into expression (3) instead

градиента напора i начальный градиент i_0 и приравняем координату z к нулю, получим выражение (4):

$$t_k = -\frac{4h^2}{\pi^2 c} \ln \frac{i_0 \gamma_w h}{2p} \quad (4)$$

of the pressure gradient i and equate the z coordinate to zero; we obtain expression (4):

РИСУНОК 3

ГРАФИКИ ЗАВИСИМОСТИ ГРАДИЕНТА НАПОРА ОТ КООРДИНАТЫ z В РАЗЛИЧНЫЕ МОМЕНТЫ ВРЕМЕНИ t

Figure 3

The graphs of dependence of the head gradient on the coordinate z at different moments of time t

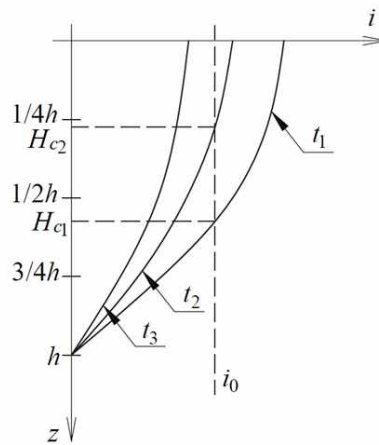
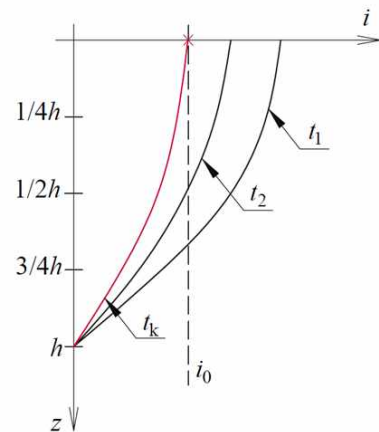


РИСУНОК 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ОКОНЧАНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННОЙ КОНСОЛИДАЦИИ

Figure 4

Filtration consolidation end time determination



Теория фильтрационной консолидации даёт схожие с практическими наблюдениями результаты лишь для слабых водонасыщенных глинистых грунтов текучей и текуче пластичной консистенции [7]. Строительство и эксплуатация зданий и сооружений в таких условиях представляет большую сложность.

The theory of filtration consolidation gives results similar to practical observations only for weak water-saturated clay soils of fluid and fluid-plastic consistency [7]. The construction and operation of buildings and structures in such conditions is very difficult.

Зачастую при строительстве зданий и сооружений на таких грунтах прибегают к усилению оснований, применяя технологию струйной цементации или пропиточной инъекции в режиме управляемого компрессионного микрогидроразрыва с применением инъекционных смесей на основе микроцементов [8-10].

Often, when constructing buildings and structures on such soils, they resort to strengthening the foundations using jet cementation technology or impregnation injection in the controlled compression micro-hydraulic fracturing mode using injection mixtures based on microcements [8-10].

Для равномерной объемной пропитки грунтового массива используются тонкомолотые вяжущие с размером частиц не более 10-15 мкм. Более крупные зерна во время инъекции грунтового массива могут закупоривать капилляры и поры, что создает технологические трудности при закреплении грунтов. Поэтому изыскиваются возможности модифицирования существующих микроцементов тонкодисперсными материалами сходными с составами грунтов.

For uniform volumetric impregnation of the soil mass, finely ground binders with a particle size of no more than 10-15 microns are used. Larger grains during soil injection can clog capillaries and pores, which creates technological difficulties in soil stabilization. Therefore, possibilities are being sought for modifying existing microcements with finely dispersed materials similar to the composition of soils.

Цель данной исследовательской работы является модифицирование керамзитовой пылью инъекционных

The purpose of this research work is to modify injection compositions based on microcement with expanded clay dust for effective consolidation of clay soils.

составов на основе микроцемента для эффективного закрепления глинистых грунтов.

Материалы и методы

В качестве основных компонентов композиций инъекционных смесей для закрепления грунтов применялись два вида микроцементов - «Микродур» и СЕМ I 42,5R (в количестве 50% от массы состава), гидросиликат натрия (в количестве 10% от массы состава), фосфат натрия (в количестве 2% от массы состава), керамзитовая пыль (в количестве 5% от массы состава).

Керамзитовая пыль представляет собой смесь частиц глинистых минералов и полевых шпатов. По данным рентгеновского микроанализа, на поверхности частиц глинистых минералов и полевых шпатов (Al, Si, O, Mg, Fe, K), входящих в состав керамзитовой пыли, адсорбирован оксид кальция CaO (рис.5)

Частицы керамзитовой пыли имеют неправильную форму и шероховатую поверхность, часть частиц имеет форму гранул (рис.6).

Materials and methods

Two types of microcements were used as the main components of the injection mixtures for soil stabilization: “Mikrodur” and CEM I 42.5R (in the amount of 50% of the composition weight), sodium hydrosilicate (in the amount of 10% of the composition weight), sodium phosphate (in the amount of 2% of the composition weight), expanded clay dust (in the amount of 5% of the composition weight).

Expanded clay dust is a mixture of clay mineral particles and feldspars. According to X-ray microanalysis data, calcium oxide CaO is adsorbed on the surface of particles of clay minerals and feldspars (Al, Si, O, Mg, Fe, K) that are part of expanded clay dust (Fig. 5)

Expanded clay dust particles have an irregular shape and a rough surface, some particles have the form of granules (Fig. 6).

РИСУНОК 5

РЕНТГЕНОВСКИЙ МИКРОАНАЛИЗ КЕРАМЗИТОВОЙ ПЫЛИ

Figure 5

X-ray microanalysis of expanded clay dust

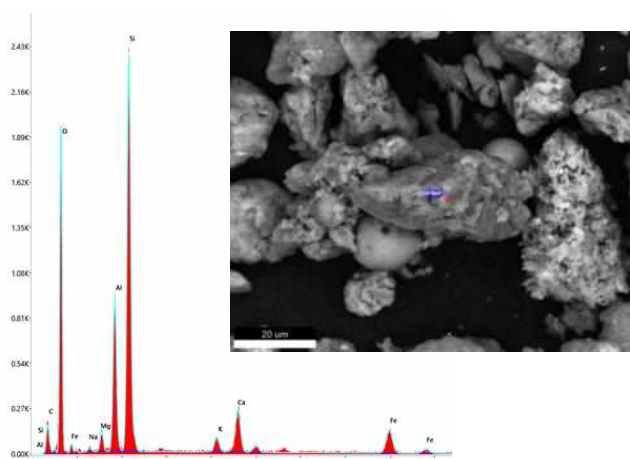
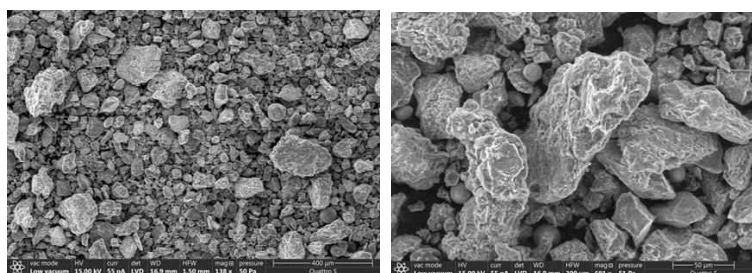


РИСУНОК 6

МИКРОСТРУКТУРА КЕРАМЗИТОВОЙ ПЫЛИ

Figure 6

Microstructure of expanded clay dust



Анализ микроструктуры затвердевших растворов осуществлялся с применением электронной микроскопии.

Образцы затвердевших растворов испытывались на прочность согласно ГОСТ 30744-2001.

Эксперименты и обсуждение результатов

Композиция на основе вяжущего повышенной дисперсности («Микродур» марки X со средним размером частиц $d_{95} < 6$ мкм), модифицированная 10% керамзитовой пылью, может применяться в составах для цементации грунтов при усилении оснований вследствие повышенной дисперсности керамзитовой пыли (с диаметром частиц до 5 мкм). Совместное ведение керамзитовой пыли и гидросиликата натрия в композиции на основе микроцементов

The microstructure of hardened mortars was analyzed using electron microscopy.

Samples of hardened mortars were tested for strength according to GOST 30744-2001.

Experiments and discussion of results

A composition based on a binder with increased dispersion (Mikrodur brand X with an average particle size of $d_{95} < 6$ μm), modified with 10% expanded clay dust, can be used in compositions for cementing soils when strengthening foundations due to the increased dispersion of expanded clay dust (with a particle diameter of up to 5 μm). The combined use of expanded clay dust and sodium hydrosilicate in a microcement-based composition

улучшают реологию системы и позволяют использовать её для усиления грунтов основания фундаментов. Как ранее установлено нашими исследованиями [3, 11], при активации керамзитовой пыли натриевым растворимым стеклом обеспечивается гидратация минералов в составе керамзитовой пыли с формированием новообразований на основе гидросиликатов и гидроалюмосиликатов кальция.

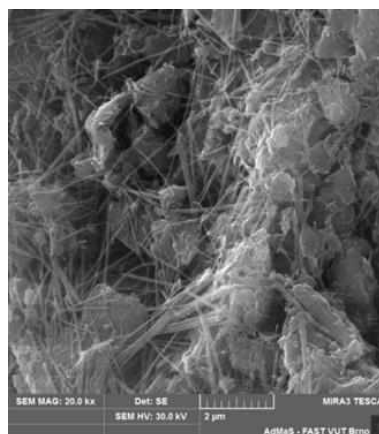
Анализ микроструктуры затвердевшего раствора (рис. 7), включающего керамзитовую пыль и воду, показал образование в системе тонких волокнистых кристаллов - гидросиликатов кальция типа CSH(B) и более толстых волокон - гидрата геленита $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$. Образование данных соединений связано с взаимодействием гидроксидов кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$, образующегося в результате взаимодействия оксида кальция CaO с водой, и аморфного кремнезёма, содержащихся в керамзитовой пыли.

РИСУНОК 7

МИКРОСТРУКТУРА ОБРАЗЦОВ, ГИДРАТИРОВАННОЙ КЕРАМЗИТОВОЙ ПЫЛИ при 20000-кратном увеличении

Figure 7

The microstructure of samples of hydrated expanded clay dust at 20000x magnification



Приведенные результаты показывают существенное влияние активной минеральной добавки в виде керамзитовой пыли и водорастворимого стекла на морфологию новообразований в цементной матрице.

Микроструктура затвердевшего состава с применением микроцемента «Микродур» представлена полуморфной коллоидной массой, обволакивающей частицы песка (рис. 8а). Реология инъекционного состава может обеспечить необходимое качество закрепления грунтов.

The presented results show a significant influence of the active mineral additive in the form of expanded clay dust and water-soluble glass on the morphology of new formations in the cement matrix.

The microstructure of the hardened composition using the “Mikrodur” microcement is represented by a semi-amorphous colloidal mass enveloping sand particles (Fig. 8a). The rheology of the injection composition can ensure the required quality of soil stabilization.

РИСУНОК 8

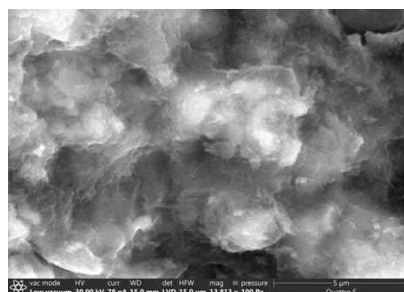
МИКРОСТРУКТУРА ЗАТВЕРДЕВШЕГО СОСТАВА ИНЪЕКЦИОННОГО СОСТАВА

а – на основе микроцемента «Микродур» при 13800-кратном увеличении
б – на основе микроцемента CEM I 42,5R при 41440-кратном увеличении

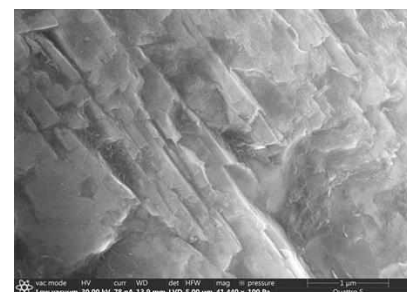
Figure 8

The microstructure of the cured injection composition

a - on the basis of Mikrodur microcement at 13800x magnification
b - on the basis of microcement CEM I 42.5R at 41440x magnification



а



б

Микроструктура затвердевшего состава с применением микроцемента CEM I 42,5R представлена плотными ориентированными пластинками,

The microstructure of the hardened composition using microcement CEM I 42.5R is represented by dense oriented plates, which are calcium hydroaluminosilicate (Fig. 8b).

представляющие собой гидроалюмосиликат кальция (рис. 8б). Связь между пластинками гидроалюмосиликата кальция обеспечивается спутанными волокнистыми новообразованиями – низкоосновными гидросиликатами кальция.

Испытания на сжатие исследуемых образцов показали повышение прочностных характеристик, по сравнению с контрольными составами без добавления керамзитовой пыли и растворимого натриевого стекла. Введение добавки керамзитовой пыли в количестве 10% и водорастворимого стекла в количестве 20% от массы микроцемента позволило добиться повышения предела прочности образцов на сжатие на 78% и 5,6 % для составов на основе микроцемента «Микродур» и CEM I 42,5R соответственно.

Заключение

Известно, что теория фильтрационной консолидации даёт схожие с практическими наблюдениями результаты лишь для слабых водонасыщенных глинистых грунтов текучей и текуче-пластичной консистенции, которые зачастую требуют усиления оснований фундаментов зданий и сооружений.

Модифицированные керамзитовой пылью составы на основе микроцемента вследствие более высокой дисперсности по сравнению с аналогичными составами на основе портландцемента имеют лучшую эффективность при закреплении глинистых грунтов. Это обусловлено тем, что размеры частиц глинистых грунтов сопоставимы с размерами частиц микроцементов и керамзитовой пыли.

Использование керамзитовой пыли для модификации инъекционных составов в качестве пуццолановой добавки позволяет уменьшить расход цементов, а также улучшить экологическую обстановку в местах складирования данного техногенного материала.

Литература:

1. Онацкий С.П. Производство керамзита. М.: Стройиздат, 1987. 333 с.
2. Сборник удельных показателей образования отходов производства и потребления. М.: Государственный комитет РФ по охране окружающей среды, 1999. 52 с.
3. Князева С.А., Яковлев Г.И., Харченко И.Я., Саидова З.С., Александров А.М., Пудов И.А., Стивенс А.Э., Бабаев А.И. Геополимерное вяжущее на основе керамзитовой пыли для инъекционных смесей в геотехническом строительстве // *Строительные материалы*. 2021. №5. С.63-68. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-791-5-63-68>
4. Далматов Б.И., Бронин В.Н., Карлов В.Д., Мангушев Р.А., Сахаров И.И., Сотников С.Н., Улицкий В.М., Фадеев А.Б. Механика грунтов. Основы геотехники. Ч. 1. М.; СПб.: АСВ, 2000. 204 с.
5. Флорин В.А. Основы механики грунтов. Л.; М.: Гос. изд-во литературы по строит., archit. и строит. материалам, 1959. Т. 2. 544 с.
6. Князева С.А. Решение одномерной задачи фильтрационной консолидации водонасыщенного глинистого грунта с учётом начального градиента напора // *Вестник гражданских инженеров*. 2018. №3 (68). С. 77-83. DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-3-77-83
7. Маслов Н.Н. Основы механики грунтов и инженерной геологии. М.: Высшая школа, 1968. 631 с.

The connection between the plates of calcium hydroaluminosilicate is provided by tangled fibrous new formations – low-basic calcium hydrosilicates.

Compression tests of the studied samples showed an increase in strength characteristics, compared to control compositions without the addition of expanded clay dust and soluble sodium glass. The introduction of expanded clay dust additives in the amount of 10% and water-soluble glass in the amount of 20% of the mass of microcement made it possible to increase the compressive strength of samples by 78% and 5.6% for compositions based on Microdur microcement and CEM I 42.5R, respectively.

Conclusions

It is known that the theory of filtration consolidation gives results similar to practical observations only for weak water-saturated clay soils of fluid and fluid-plastic consistency, which often require strengthening the foundations of buildings and structures.

Microcement-based compositions modified with expanded clay dust, due to their higher dispersion compared to similar compositions based on Portland cement, have better efficiency in stabilizing clay soils. This is due to the fact that the particle sizes of clay soils are comparable to the particle sizes of microcements and expanded clay dust.

The use of expanded clay dust for modification of injection compositions as a pozzolanic additive allows to reduce the consumption of cements, as well as to improve the environmental situation in places where this man-made material is stored.

References:

1. Onatsky S.P. Production of expanded clay. Moscow: Stroyizdat, 1987. 333 p.
2. Collection of specific indicators of production and consumption waste formation. Moscow: State Committee of the Russian Federation for Environmental Protection, 1999. 52 p.
3. Knyazeva S.A., Yakovlev G.I., Kharchenko I.Ya., Saidova Z.S., Aleksandrov A.M., Pudov I.A., Stevens A.E., Babaev A.I. Geopolymer binder based on expanded clay dust for injection mixtures in geotechnical construction // *Stroitel'nyye materialy*. 2021. No. 5. P. 63-68. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-791-5-63-68>
4. Dalmatov B.I., Bronin V.N., Karlov V.D., Mangushev R.A., Sakharov I.I., Sotnikov S.N., Ulitsky V.M., Fadeev A.B. Soil mechanics. Fundamentals of geotechnics. Part 1. M.; St. Petersburg: ACB, 2000. 204 p.
5. Florin V.A. Fundamentals of Soil Mechanics. L.; M.: State Publishing House of Literature on Construction, Architecture and Construction Materials, 1959. Vol. 2. 544 p.
6. Knyazeva S.A. Solution of one-dimensional problem of filtration consolidation of water-saturated clay soil taking into account the initial pressure gradient // *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2018. No. 3 (68). P. 77-83. DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-3-77-83
7. Maslov N.N. Fundamentals of Soil Mechanics and Engineering Geology. Moscow: Higher School, 1968. 631 p.

8. Малинин А.Г. Струйная цементация грунтов. М.: Стройиздат, 2010. 226 с.
9. Ибрагимов М.Н., Семкин В.В. Закрепление грунтов инъекцией цементных растворов. М.: АСВ, 2012. 256 с.
10. Разработка цементных композиций с тонкодисперсным перлитом для инъекционного закрепления грунтов / Ю.Р. Кривобородов, И.В. Козлова, О.В. Земскова, Н.С. Борисенков // *Техника и технология силикатов*. – 2023. – Т. 30, № 3. – С. 272-280. – EDN QULEOY.
11. Князева С.А., Яковлев Г.И., Харченко А.И. Геополимерное вяжущее на основе керамзитовой пыли для геотехнического строительства // *Строительные материалы*. 2021. №12. С.69-72. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-798-12-69-72>
8. Malinin A.G. Jet Cementation of Soils. Moscow: Stroyizdat, 2010. 226 p.
9. Ibragimov M.N., Semkin V.V. Soil stabilization by injection of cement mortars. Moscow: ASV, 2012. 256 p.
10. Development of cement compositions with finely dispersed perlite for injection soil stabilization / Yu.R. Krivoborodov, I.V. Kozlova, O.V. Zemskova, N.S. Borisenkov // *Technique and technology of silicates*. - 2023. - Vol. 30, No. 3. - Pp. 272-280. - EDN QULEOY.
11. Knyazeva S.A., Yakovlev G.I., Kharchenko A.I. Geopolymer binder based on expanded clay dust for geotechnical construction // *Stroitel'nyye materialy*. 2021. No. 12. P. 69-72. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-798-12-69-72>

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки, грант №075-15-2023-590 (научный руководитель – д.т.н., профессор Яковлев Г.И.)

The research was carried out in the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kalashnikov Izhevsk State Technical University" with funds from the Ministry of Education and Science grant No. 075-15-2023-590 (head – Yakovlev G.I.).

Князева Светлана Анатольевна – аспирант, ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова», Email: SvetikSm_Knyazeva@mail.ru

Яковлев Григорий Иванович – заведующий кафедрой СММиГ, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова», Email: gyakov@istu.ru

Лисин Владимир Алексеевич – аспирант, ст.преподаватель, ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова», Email: Vladimirlisin2@gmail.ru

Гилячев Ильдар Госманович – аспирант, ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова», Email: gig.vektor-bmz@bk.ru

Бурьянов Александр Федорович – доктор технических наук, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Email: rga-service@mail.ru

Вклад авторов: Яковлев Г.И. - идея, научное руководство, научное редактирование статьи; Князева С.А., Лисин В.А., Гилячев И.Г. – разработка методик, обработка материала, написание статьи; Бурьянов А.Ф. – идея, научное руководство, обработка материала, написание статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Knyazeva Svetlana Anatol'evna - postgraduate student, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Email: SvetikSm_Knyazeva@mail.ru

Yakovlev Grigory Ivanovich - Head of Department, Doctor of Technical Sciences, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Email: gyakov@istu.ru

Lisin Vladimir Alekseevich – postgraduate student, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Email: Vladimirlisin2@gmail.ru

Gilyachev Ildar Gosmanovich – postgraduate student, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Email: gig.vektor-bmz@bk.ru

Buryanov Aleksandr Fedorovich - Doctor of Technical Sciences, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Email: rga-service@mail.ru

Contribution of the author: Yakovlev G.I.- idea, scientific leadership, scientific editing of the article; Knyazeva S.A., Lisin V.A., Gilyachev I.G. – development of methods, processing of material, writing an article; Buryanov A.F. – idea, scientific guidance, material processing, article writing.

The authors declare that there is no conflict of interest.