

ТЕХНИКА ГЕОЛОГО-РАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ  
GEOLOGICAL EXPLORATION TECHNIQUE

УДК 550.82:622.24

ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПОДЗЕМНОЙ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ  
МЕТОДОМ ОПЕРЕЖАЮЩЕГО ЗАКРЕПЛЕНИЯ ГРУНТОБЕТОНОМ

*О.А. ВОЛКОВА<sup>1</sup>, Ю.А. АРСЕНТЬЕВ<sup>2</sup>, С.В. ИЛЯХИН<sup>2</sup>, А.П. НАЗАРОВ<sup>2</sup>*

*1000 «Мосинжиниринг Групп»  
корп. 2, д. 9, Петрозаводская улица, г. Москва 125502, Россия  
e-mail: volk\_olg@mail.ru*

*<sup>2</sup>ФГБУВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе»  
23, ул. Миклухо-Маклая, г. Москва 117977, Россия  
e-mail: arsentev1956@yandex.ru*

Одним из наиболее эффективных приёмов при геотехническом строительстве в условиях городской среды, позволяющий в короткие сроки и с минимальным ущербом обеспечить стабилизацию горных пород и исключить попадание воды в горные выработки, является струйная технология (Jet Grouting) закрепления грунтов. Но её широкое применение сдерживается отсутствием методологии выбора соотношения объёмов закрепляемого пространства к незакрепленному, что существенно затрудняет назначение проектных характеристик системы горная выработка—закрепляемый массив. С целью определения их величин проведено математическое моделирование системы горная выработка—закрепляемый массив. В качестве исходных данных приняты инженерно-геологические условия, типичные для центральной части г. Москвы. Обоснованы расчётные параметры системы горная выработка—закрепляемый массив при проходке подземной выработки круглого сечения в слабых грунтах с использованием их опережающего закрепления грунтобетонном.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** слабые грунты; грунтобетон; упруго-пластическая модель; коэффициент повышения характеристики пластичности грунтов; условная закладка; горная выработка.

DOI:10.32454/0016-7762-2019-2-54-59

INCREASING THE STABILITY OF UNDERGROUND MINING USING  
THE METHOD OF ADVANCED FASTENING OF SOIL-CONCRETE

*O.A. VOLKOVA<sup>1</sup>, YU.A. ARSENTYEV<sup>2</sup>, S.V. ILAYKHIN<sup>2</sup>, A.P. NAZAROV<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>LLC «Mosinzhiniring Group»  
building 2, house 9, Petrozavodskaya street, Moscow 125502, Russia  
e-mail: volk\_olg@mail.ru*

*<sup>2</sup>Russian State Geological Prospecting University  
23, Miklouho-Maklay's street, Moscow 117977, Russia  
e-mail: arsentev1956@yandex.ru*

One of the most effective methods in the geotechnical construction at the urban conditions, which allows providing the stabilization of the rocks and elimination of the ingress of water into the mine workings, in a short time and with minimal damage, is the jet technology (JetGrouting) of fixing of the soils. But with all advantages of JetGrouting

technology, its wide application is constrained by the lack of the methodology for choosing the ratio of the fixed space volume to the unfixed, which significantly complicates the appointment of design characteristics of the system «mine working-massif of rocks to be fixed». In this regard, it was necessary to carry out the mathematical modeling of the parameters of this system. Engineering-geological conditions typical for the central part of Moscow have been accepted as initial data. The substantiation of design parameters of the system during the penetration of mining with round section in weak soils by their advanced fixing by a grouting has been presented.

**К е у в о р д с:** weak soils; soil concrete; elastic-plastic model; limited plastic deformation without destruction; coefficient of increase of characteristics of plasticity of soils; conditional filling; mining.

К настоящему времени разработан ряд технологических приёмов, позволяющих производить геотехнические строительные работы в сложных инженерно-геологических условиях. К таким приёмам следует отнести: замораживание, силикатизацию, цементацию или смолизацию [4] и струйную технологию (Jet Grouting) закрепления грунтов [3]. Причем последняя в условиях плотной городской застройки даёт возможность в короткие сроки и с минимальным ущербом для жилых зданий и сооружений, имеющих культурно-историческое значение, обеспечить устойчивость горных пород и исключить проникновение грунтовых вод в горные выработки. Сущность струйной технологии заключается в изменении прочностных свойств массива грунтов путём воздействия на него излившейся из сопла форсунки высокоскоростной суспензионной водоцементной струи, вращающейся в плоскости, перпендикулярной к оси предварительно пробуриваемой до проектной отметки скважины, с одновременным перемещением форсунки, обратным ходом, вдоль этой оси до следующей проектной отметки без создания в массиве избыточного давления. В результате разрушения и перемешивания грунтов суспензионной струей формируется закреплённый породный массив цилиндрической формы заданной длины, состоящий из нового материала — грунтобетона. По составу получаемый грунтобетон может быть близок к мелкозернистым бетонам, особенно если разрушаемый грунт представлен песчаными разностями, что характерно для условий строительства в г. Москве. При всех достоинствах технологии Jet Grouting её применение сдерживается отсутствием методологии выбора соотношения между закрепляемым и незакреплённым объёмами породного массива, что существенно затрудняет назначение расчётных параметров и проектных характеристик системы горная выработка — закрепляемый массив [5]. Для установления их величины проведено математическое моделирование системы горная выработка—закрепляемый массив. В качестве исходных данных приняты инженерно-геологические условия, характерные для центральной части г. Москвы.

Однако проходка выработки по указанной технологии подразумевает полное изменение прочностных свойств грунта всего массива, что при-

водит в дальнейшем к значительным энергетическим затратам, связанным как с повышенным объёмом закрепляемого пространства, так и с последующим процессом разрушения грунтов, приобретающих в соответствии с принятой технологией высокие механические характеристики, в том числе и в пределах контура будущей горной выработки.

С целью снижения энергозатрат на проведение горной выработки с использованием струйной технологии предлагается выполнять ограниченное по объёму массива изменение механических свойств грунтов, т. е. процедуру закрепления только для тех грунтов, которые окружают контур будущей выработки.

Таким образом, формируется массив с изменёнными свойствами, охватывающий пространство, заполненное слабыми грунтами, выполняющими роль условно опережающей закладки. Если предположить, что грунты с изменёнными механическими свойствами в окружении выработки, обладающие как внутренним трением  $\varphi$ , так и сцеплением  $C$ , представляют упругопластический массив, соответствующий модели Н.С. Булычева (рис. 1, а.) и характеризуемый графиком (рис. 1, б.), то его разрушению будет предшествовать некоторая пластическая деформация, протекающая с определённой скоростью. Отпор, создаваемый «условно опережающей закладкой», представленный на модели в виде внутреннего давления  $p$ , распределённого равномерно по контуру выработки радиуса  $r_0$ , будет выступать в качестве силового фактора, замедляющего процесс распространения пластической деформации и отдаляющего начальный момент образования зоны разрушения.

В случае действия внутреннего давления  $p$ , достаточное условие исчерпания прочности грунта будет иметь следующий вид [1]:

$$\varepsilon_0^{(p)} = \varepsilon_c^{(p)}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_c^{(p)}$  — общая предельная деформация грунтов;  $\varepsilon_0^{(p)}$  — предельная пластическая деформация.

При этом предельная пластическая деформация  $\varepsilon_0^{(p)}$  при наличии внутреннего давления  $p$  может быть определена из выражения следующего вида [1, 2]:

$$\varepsilon_0^{(p)} = \frac{\gamma H + C \operatorname{ctg} \varphi \left( \frac{r_e}{r_0} \right)^2}{2G} \sin \varphi, \quad (2)$$

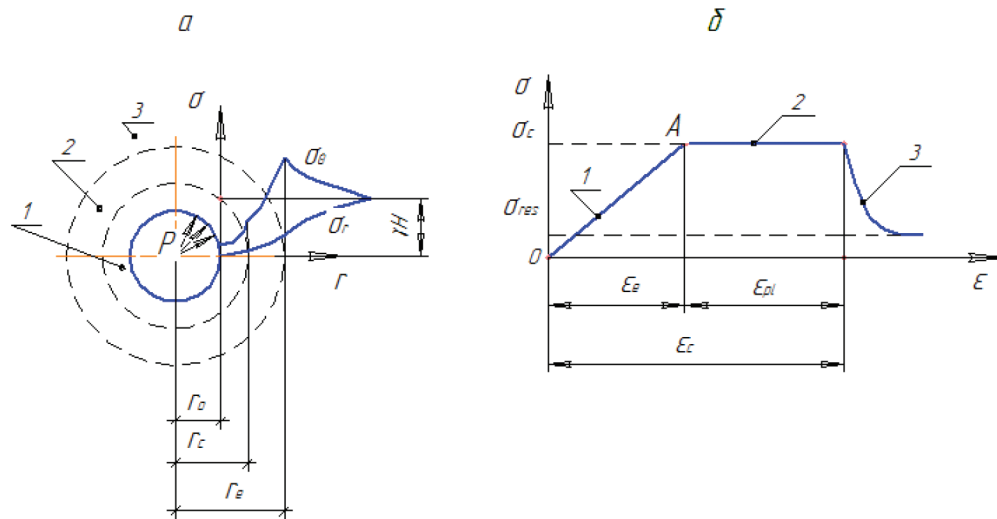


Рис. 1. Схема (а) и диаграмма напряжений (б) упругопластической модели с ограниченной пластической деформацией массива с горной выработкой: 1 – зона упругих деформаций; 2 – зона пластических деформаций, протекающих без разрушения; 3 – зона разрушения, характеризующая постепенным снижением сопротивления

где  $\gamma$  — удельный вес грунтов, Н/м<sup>3</sup>;  $H$  — глубина заложения выработки, м;  $G$  — модуль сдвига, МПа.

Относительный радиус границы зоны пластических деформаций  $\frac{r_e}{r_0}$ , входящий в состав выраже-

ния (2), можно найти с помощью дифференциального уравнения равновесия для массива грунтов, который моделируется невесомой упругопластической средой, характеризующейся для упрощения решения только внутренним трением  $\varphi$ :

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0. \quad (3)$$

При этом соотношение между нормальными радиальным и тангенциальным напряжениями  $\sigma_r$  и  $\sigma_\theta$  в зоне пластических деформаций определяется условием предельного состояния вида (согласно теории Кулона-Мора):

$$\sigma_\theta = \sigma_c + \beta \sigma_r, \quad (4)$$

где  $\beta = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$  — параметр объёмной прочности,

которое с учётом принятого допущения ( $\sigma_c = 0$ ) принимает следующий вид

$$\sigma_\theta = \beta \sigma_r. \quad (5)$$

Подставив соотношение (5) в уравнение (3) и разделив переменные, имеем.

$$\frac{d\sigma_r}{\sigma_r} = (\beta - 1) \frac{dr}{r}, \quad (6)$$

Проинтегрировав выражение (6), получим

$$\ln \sigma_r = (\beta - 1) \ln r + \ln C_1$$

или

$$\sigma_r = C_1 r^{\beta-1}.$$

Постоянную интегрирования  $C_1$  найдём из условия, что на контуре сечения выработки (при  $r = r_0$ )  $\sigma_r = p$ . Тогда с учётом (7)

$$C_1 = \frac{p}{r_0^{\beta-1}}. \quad (8)$$

Таким образом, в зоне пластических деформаций напряжения с учётом сцепления  $C$  характеризуются зависимостями вида:

$$\begin{cases} \sigma_r = (p + C \operatorname{ctg} \varphi) \left( \frac{r}{r_0} \right)^{\beta-1}; \\ \sigma_\theta = \beta (p + C \operatorname{ctg} \varphi) \left( \frac{r}{r_0} \right)^{\beta-1}. \end{cases} \quad (9)$$

$$\text{где } \beta - 1 = \alpha = \frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}.$$

Далее воспользуемся условием непрерывности напряжений на границе между пластической и упругой зонами при  $r = r_e$ , где напряжения одновременно определяются как по законам теории упругости, так и по теории пластичности (рис. 1, б, точка А).

В связи с этим для точек на границе пластической и упругой областей должны быть, во-первых, справедливы соотношения (9), во-вторых, напряжения  $\sigma_r$  и  $\sigma_\theta$  должны удовлетворять первому варианту тензора напряжений упругости (для упругой зоны), имеющего вид:

$$\sigma_r + \sigma_\theta = 2(\gamma H + C \operatorname{ctg} \varphi) = \text{const}. \quad (10)$$

Подставляя в (10) значения напряжений (9) и выполняя простейшие преобразования, получим выражение, определяющее относительный радиус границы зоны пластических деформаций:

$$\frac{r_e}{r_0} = \left[ \frac{\gamma H + C \operatorname{ctg} \varphi}{p + C \operatorname{ctg} \varphi} (1 - \sin \varphi) \right]^{\frac{1}{\alpha}}. \quad (11)$$

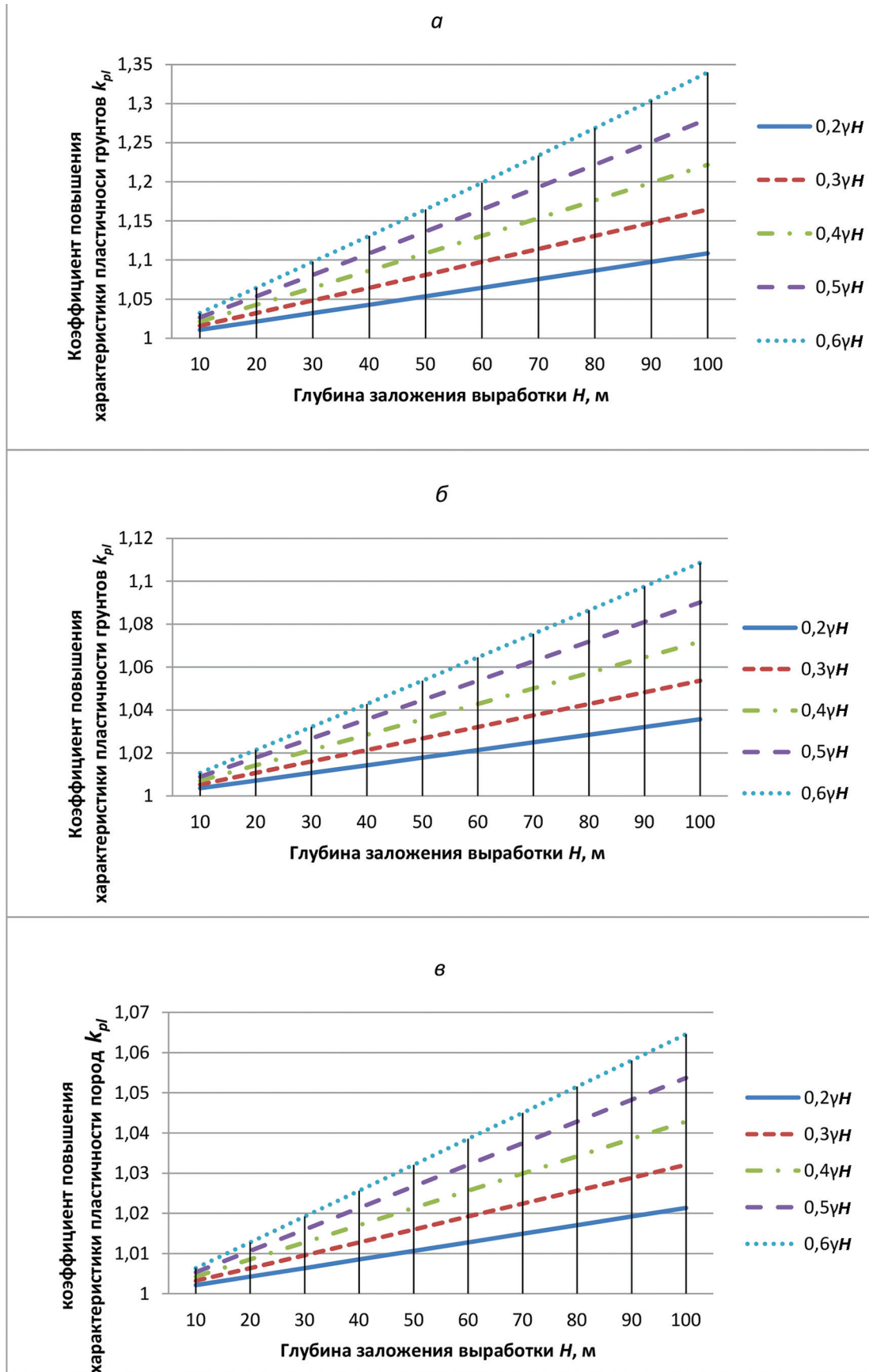


Рис. 2. Зависимости величины коэффициента повышения характеристики пластичности грунтов  $k_{pl}$  от глубины заложения выработки  $H$ , при различных значениях  $C$ , МПа: *a* – 6, *б* – 18, *в* – 30 при  $\gamma = 0,026$  МН/м<sup>3</sup>;  $\varphi = 35^\circ$

Тогда после подстановки в выражение (2) результата (11) предельная пластическая деформация с учётом внутреннего давления на контур выработки будет равна:

$$\varepsilon_0^{(p)} = \frac{\gamma H + C \operatorname{ctg} \varphi}{2G} \left[ \frac{\gamma H + C \operatorname{ctg} \varphi}{p + C \operatorname{ctg} \varphi} (1 - \sin \varphi) \right]^{\frac{2}{a}} \sin \varphi \quad (12)$$

а условие истощения прочности, в соответствии с (1), принимает вид:

$$\frac{\gamma H + C \operatorname{ctg} \varphi}{2G} \sin \varphi \left[ \frac{\gamma H + C \operatorname{ctg} \varphi}{p + C \operatorname{ctg} \varphi} (1 - \sin \varphi) \right]^{\frac{2}{a}} = \varepsilon_c^{(p)} \quad (13)$$

Преобразуем левую часть равенства (13) следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{C \cos \varphi}{2G(1 - \sin \varphi)} \left[ \frac{\gamma H + C \operatorname{ctg} \varphi}{C \operatorname{ctg} \varphi} (1 - \sin \varphi) \right]^{\frac{1}{\sin \varphi}} \left[ \frac{C \operatorname{ctg} \varphi}{p + C \operatorname{ctg} \varphi} \right]^{\frac{2}{a}} = \\ = \varepsilon_e^0 \Pi_\varepsilon = \left[ \frac{C \operatorname{ctg} \varphi}{p + C \operatorname{ctg} \varphi} \right]^{\frac{2}{a}} = \varepsilon_c^{(0)} \left[ \frac{C \operatorname{ctg} \varphi}{p + C \operatorname{ctg} \varphi} \right]^{\frac{2}{a}}, \end{aligned}$$

где  $\left[ \frac{\gamma H + C \operatorname{ctg} \varphi}{C \operatorname{ctg} \varphi} (1 - \sin \varphi) \right]^{\frac{1}{\sin \varphi}} = \Pi_\varepsilon$  — характеристика пластичности грунтов при отсутствии внутреннего давления.

Тогда

$$\varepsilon_c^{(p)} = \left[ \frac{C \operatorname{ctg} \varphi}{p + C \operatorname{ctg} \varphi} \right]^{\frac{2}{a}} = \varepsilon_c^{(0)}, \quad (14)$$

где  $\varepsilon_c^{(0)}$  — общая предельная деформация грунтов при отсутствии внутреннего давления.

Из (14) следует, что множитель  $\left[ \frac{C \operatorname{ctg} \varphi}{p + C \operatorname{ctg} \varphi} \right]^{\frac{2}{a}}$ , будет представлять собой параметр замедления процесса распространения пластической деформации. Величина обратная ему будет соответственно коэффициентом повышения характеристики пластичности грунтов, окружающих выработку, который с учётом введённого обозначения  $k_{pl}$  будет определяться, как

$$k_{pl} = \left[ \frac{p + C \operatorname{ctg} \varphi}{C \operatorname{ctg} \varphi} \right]^{\frac{(1 - \sin \varphi)}{\sin \varphi}} \quad (15)$$

Тогда коэффициент повышения устойчивости  $k_s$ , входящий в состав критерия устойчивости грунтов вида  $\gamma H k_s \leq k_s \sigma_c$ , для предлагаемой технологии проходки горной выработки, будет определяться, с учётом (15), по формуле вида:

$$k_s = 1 + \frac{1}{\sin \varphi} [k_{pl} \Pi_\varepsilon^{\sin \varphi} - 1] \quad (16)$$

Из формулы (16) следует, что увеличение внутреннего давления  $p$ , при прочих равных условиях, приводит к повышению устойчивости грунтов, окружающих выработку.

Для количественной оценки влияния «условно опережающей закладки» на устойчивость грунтов, окружающих подземную горную выработку круглого сечения, определим численные значения коэффициента повышения характеристики пластичности грунтов для различных внешних условий.

Для этой цели в качестве исходных значений параметров, составляющих формулу (15), примем  $\gamma = 0,026$  МН/м<sup>3</sup>;  $\varphi = 35^\circ$ ;  $p = k_p \gamma H$  ( $k_p = 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6$ );  $H = 10, 20, 30, \dots, 100$  м;  $C = 6$  МПа; 18 МПа; 30 МПа.

## Выводы

По результатам вычислений построены графические зависимости (рис. 2).

Анализ которых позволяет заключить следующие выводы:

1. При постоянной глубине заложения выработки  $H$  наблюдается рост величины коэффициента повышения характеристики пластичности грунтов  $k_{pl}$  пропорционального величине отпора  $p$ , создаваемого «условно опережающей закладкой». Так, при  $H = 100$  м рост соответственно составляет при  $C = 6$  МПа — 14,88%; при  $C = 18$  МПа — 5,6%; при  $C = 30$  МПа — 3,46%.

2. При постоянной величине отпора  $p$  отмечается увеличение коэффициента повышения пластичности грунтов  $k_{pl}$ , пропорциональное росту глубины заложения выработки  $H$ . Например, при  $p = 0,6 \gamma H$  рост  $k_{pl}$  составляет при  $C = 6$  МПа — 28%; при  $C = 18$  МПа — 9,2%; при  $C = 30$  МПа — 5,47%.

3. Наибольший эффект от замедления процесса распространения пластической деформации проявляется в грунтах, характеризующихся малым сцеплением ( $C = 6$  МПа).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Булычев Н.С. Механика подземных сооружений М.: Недра, 1989. 270 с.
2. Борисов А.А. Механика горных пород и массивов М.: Недра, 1980. 360 с.
3. Гришко Д.А. Обоснование технологических параметров струйной цементации песчаных грунтов М.: Горная книга, 2018. 23 с.
4. Ибрагимов М.Н., Семкин В.В., Шапошников А.В. Цементация грунтов инъекцией растворов в строительстве М.: АСВ, 2017. 265 с.
5. Черняков А.В. Применение инновационных разработок при строительстве тоннелей в сложных градостроительных и инженерно-геологических условиях//Метро и тоннели. 2011. № 3. С. 8–12.

## REFERENCES

1. Bulychev N.S. *Mechanica of podzemnich soorugeny*. M., Nedra Publ, 1989, 270 p. (in Russian)
2. Borisov A.A. *Mechanica gorniy porod i massivov*. M., Nedra Publ, 1980, 360 p. (in Russian)
3. Grishko D.A. *Substantiation of technological parameters of jet cementation of sandy soils*. M., Gornaya kniga Publ, 2018, 23 p.
4. Ibragimov M.N., Semkin V.V., Shaposhnikov A.V. *Cementation of soils by injection of solutions in construction*. M., ACB Publ, 2017, 265 p.
5. Chernyakov A.V. Application of innovative developments in the construction of tunnels in complex urban planning and engineering-geological conditions. *Metro and tunnels*, 2011, no 3, pp. 8–12.