



# ГЕОМЕХАНИКА

УДК 539.3+622.28+624.121

**Е.Я. КОЗЛОВСКИЙ**

аспирант кафедры теоретической и прикладной механики<sup>1</sup>

E-mail: jkazlouski@outlook.com

**М.А. ЖУРАВКОВ**, д-р физ.-мат. наук, проф.

заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики<sup>1</sup>

E-mail: zhuravkov@bsu.by

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 12.12.2022.

## ВЛИЯНИЕ УСАДКИ И ПОЛЗУЧЕСТИ БЕТОНА НА ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ «КРЕПЬ — МАССИВ СОЛЯНЫХ ПОРОД»

*В работе представлено сравнение различных подходов к проблеме учета явлений усадки и ползучести бетона при строительстве подземных сооружений в соляных массивах. Сравнение выполнено по результатам численного моделирования напряженно-деформированного состояния крепления шахтного ствола. В результате модельных исследований установлено значительное влияние способа учета усадки и ползучести бетона на результаты расчетов, что особенно актуально с учетом тенденций к изменению составов современных бетонов и характерных отличий рецептур бетонов, применяемых в подземном строительстве. На основании полученных результатов выданы рекомендации по учету установленных явлений через использование функций ползучести непосредственно с учетом особенностей рецептуры и технологии.*

**Ключевые слова:** геомеханика, подземные сооружения, соляные породы, ползучесть бетона, шахтный ствол

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2023-1-62-95-100>

**Введение.** В подземном строительстве наибольшее распространение имеют конструкции крепей, сооружаемые с использованием монолитного бетона. Особенностью подобных конструкций в геотехнике является проблема корректного учета деформаций усадки и ползучести бетона.

Как правило, при расчетах крепей на стадии проектирования используют упрощенные методики, учитывающие снижение жесткости бетона через коэффициент ползучести в предельный момент времени, определяемый по классу бетона и средней месячной относительной влажности воздуха наиболее теплого месяца для района строительства (а также, но значительно реже, с дополнительным учетом геометрических размеров и возраста бетона в момент нагружения). Важно отметить, что подобный подход не отража-

ет специфику подземных сооружений — контакт с грунтом или породой с внешней стороны конструкции и возможную изоляцию с внутренней.

Несмотря на практическую эффективность упрощенных методик на стадии проектирования, использование подобного подхода неприменимо в задачах, связанных с научно-техническим сопровождением и интерпретацией результатов мониторинга, т. к. подобные задачи требуют детального учета большого количества нелинейных факторов (стадийности производства работ, фактора времени, возраста бетона) как для анализа механического поведения массива, так и строительных конструкций [1, 2].

Обозначенная научная проблема исследовалась многими авторами для случаев возведения обделок и крепи вблизи забоя подземных соору-

жений, где происходит существенное нагружение в раннем возрасте [3–5] и рассматривается в различных документах (AFTES, ИТА, ÖBV). Однако исследование нелинейного механического поведения бетона при строительстве шахтных стволов и капитальных подземных выработок в массивах горных пород с ярко выраженными реологическими свойствами, таких как массивы соляных пород [6–8], до сих пор представляет собой особенно актуальную задачу. Отметим, что многими исследователями и ранее подчеркивалась необходимость учета этого фактора [9]. Но отсутствие достаточных данных о реономном поведении бетонов при использовании в подземном строительстве, слабая изученность поведения бетонов в условиях массивов соляных пород на глубоких горизонтах, отсутствие современных технологий выполнения компьютерного моделирования не позволяли строить сложные механико-математические модели.

*Цель работы* — получить качественное сравнение изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) геотехнической системы «крепь — массив соляных пород» учета усадки и ползучести бетона при использовании упрощенного и продвинутого методов.

**Постановка задачи.** Для получения качественного сравнения подходов к учету ползучести и усадки бетона крепи рассматривается задача проходки и крепления шахтного ствола в массиве каменной соли. Модельная задача решается в условиях плоско-деформированного состояния, а в качестве расчетной схемы рассматривается полупространство с вертикальной выработкой диаметром 7 м в проходке. Принимается, что крепь возводится с отставанием в 30 суток, а сама крепь рассматривается для двух расчетных ситуаций:

- ситуация 1 — бетонная крепь толщиной 0,7 м из бетона класса С40/50 при уровне напряжений в массиве 14 МПа при  $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z$ ;

- ситуация 2 — комбинированная чугунно-бетонная крепь с тьюбингами типоразмера «100» и толщиной затюбингового бетона 0,7 м класса С40/50 при уровне напряжений в массиве 19 МПа при  $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z$ .

Уровень природных напряжений в породном массиве для рассматриваемых расчетных ситуаций выбирается таким образом, чтобы возникающие напряжения в бетоне не достигали границы нелинейной ползучести либо приближались в ней только при весьма большом значении возраста бетона, что не сказывается на сравнении результатов между собой, но в то же время расчетная ситуация остается «реалистичной».

Расчетная модель состоит из тел  $\Omega_i$ , каждому из которых соответствует набор механических характеристик  $E_i, \nu_i$  и др. Телу  $\Omega_1$  соответствует массив горных пород,  $\Omega_2$  — бетон,  $\Omega_3$  — чугунная тьюбинговая крепь. Граничные условия на внешних границах модели имеют следующий вид:

$$\begin{cases} u_x|_{x=0, A} = 0; \\ u_y|_{y=0} = 0; \\ \sigma_{yy}|_{y=B} = \Sigma_{yy}, \end{cases}$$

где  $x, y$  — декартовы координаты;  $u_i$  — перемещения в  $i$ -м направлении;  $\sigma_{ij}$  — компоненты тензора напряжений;  $\Sigma_{ii}$  — функция напряжений от собственного веса вышележащего пространства;  $A, B$  — координаты внешних границ.

Численное моделирование выполняется с учетом стадийности рассматриваемых процессов, влияющей на НДС подземного сооружения. В рамках исследования были приняты следующие стадии (рисунок 1):

- стадия 1 (начальная стадия) — определяется начальное напряженное состояние массива соляных пород;

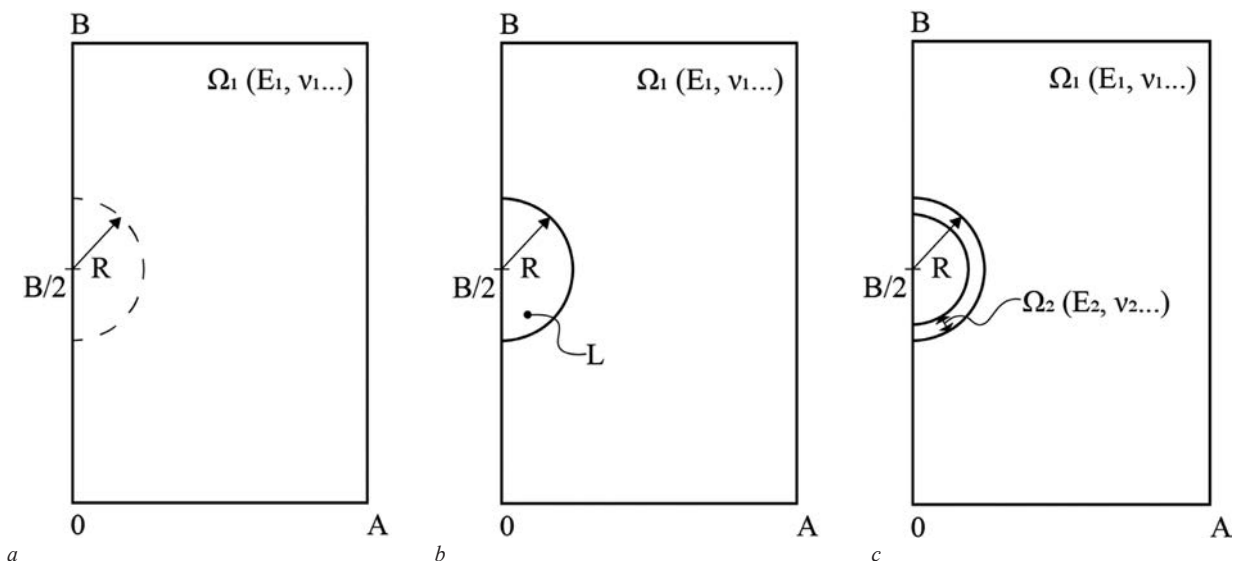


Рисунок 1 — Упрощенные расчетная схема и стадии: а — стадия 1; б — стадии 2–3; с — стадии 4–5  
 Figure 1 — Simplified design model and stages: a — stage 1; b — stages 2–3; c — stages 4–5

- стадия 2 (проходка выработки) — пространство выработки  $L$  исключается из модели, определяет НДС массива, окружающего выработку;
- стадия 3 — определяется НДС в первые 30 суток после проходки выработки;
- стадия 4 (возведение крепи) — включение в модель тел бетонной крепи  $\Omega_2$  (и для расчетной ситуации № 2 — чугунных тубингов  $\Omega_3$ );
- стадия 5 — определяется изменение НДС массива и крепи в течение 50 лет после возведения крепи.

Важно, что в рамках геометрически нелинейной постановки используются сетки конечных элементов крепи, которые строятся таким специальным образом, чтобы было возможно их корректное введение в деформированную модель на промежуточной стадии без получения «артефактных» напряжений как в самой крепи, так и в окружающем массиве.

Массив соляных пород моделируется средой, поведение которой описывается комбинацией модели Мора–Кулона и двойной степенной модели ползучести. При этом полные относительные деформации  $\varepsilon$  состоят из упругих  $\varepsilon^{el}$ , независимых от времени пластических  $\varepsilon^{pl}$  и деформаций ползучести  $\varepsilon^{cr}$ . Используемая функция ползучести в свою очередь состоит из двух составляющих — линейной (частно называемой рекристаллизационной и, как предполагается на основании экспериментальных данных, вызываемой химическими процессами растворения и переосаждения на границах зерен под давлением [10, 11]) и степенной (вызываемой различными механизмами дислокационной ползучести):

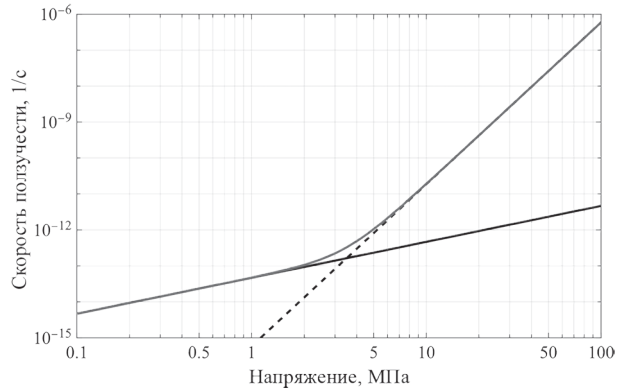
$$\varepsilon = \varepsilon^{el} + \varepsilon^{pl} + \varepsilon^{cr};$$

$$\dot{\varepsilon}^{cr} = A_1 \exp\left(-\frac{Q_1}{RT}\right) \sigma + A_2 \exp\left(-\frac{Q_2}{RT}\right) \sigma^{n_2},$$

где  $A_1, A_2, n_2$  — коэффициенты;  $Q_1, Q_2$  — энергия активации процесса ползучести;  $R$  — универсальная газовая постоянная;  $T$  — абсолютная температура.

Задача решается без привязки к конкретному объекту или местности, поэтому параметры модели ползучести для массива соляных пород ( $A, Q, n$ ) принимаются по справочным данным как для соляных структур Veendam (рисунок 2) [10], прочность каменной соли на одноосное сжатие составляет 21 МПа.

Известно большое количество моделей ползучести в бетонных конструкциях, предложенных различными исследователями (например, [11–13]), а также изложенных в методиках нормативных документов АСІ, СЕВ, EN, fib, рекомендациях НИИЖБ и ЦНИИС. Предлагаемые к использованию параметры моделей также могут значительно отличаться в количестве учитываемых факторов, концентрируясь на основных (возраст в момент



**Рисунок 2 — График скорости относительных деформаций ползучести от напряжений согласно принятым исходным данным [10]: черная сплошная линия — линейная ползучесть; пунктирная линия — степенная ползучесть; серая линия — полная скорость деформаций ползучести**  
**Figure 2 — Plot of the creep strain rate versus stress according to the accepted reference [10]: black solid line — linear creep; dashed line — power-law creep; gray line — full rate of creep strain**

загружения, модуль открытой поверхности, относительная влажность окружающего воздуха) либо учитывая большое их количество (температура, добавки, крупность помола цемента, водоцементное соотношение, влагосодержание и др.).

При численном моделировании деформаций усадки и ползучести бетона в ответственных сооружениях является распространенным и довольно универсальным подходом использование аппроксимации функции ползучести  $J(t, t')$  с использованием ряда Дирихле [14; 15]:

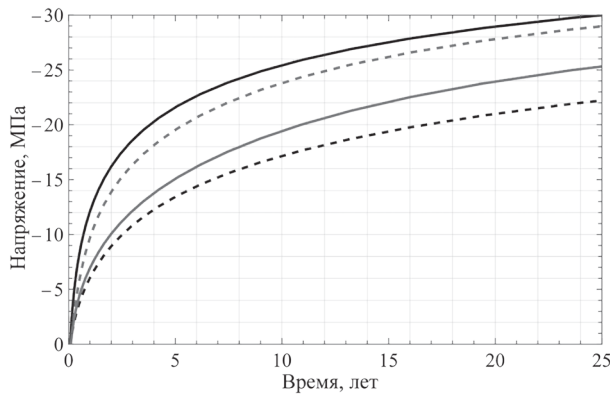
$$J(t, t') = \frac{1}{E_0(t')} + \sum_{i=1}^n \frac{1 - e^{-\frac{t-t'}{\tau_i}}}{D_i(t')},$$

где  $t$  — время;  $t'$  — время приложения нагрузки;  $\tau$  — время релаксации.

Физически подобную аппроксимацию функции ползучести  $J(t, t')$  можно интерпретировать как обобщенную стареющую модель Кельвина, представляющую собой совокупность последовательно соединенных тел Кельвина.

В рамках модельных исследований выполняется сравнение НДС крепи для следующих вариантов:

- вариант 1 — использование начального модуля упругости бетона без учета явлений усадки и ползучести;
- вариант 2 — использование характеристики ползучести в предельный момент времени (предельной характеристики ползучести)  $\varphi(\infty, 28)$ , определяемого исключительно по относительной влажности окружающей среды;
- вариант 3 — использование функции ползучести  $J(t, t')$ , получаемой через определяющие уравнения характеристики ползучести  $\varphi(t, t')$  согласно методике EN (белорусские нормативные документы СП и ТКП EN, международные EN и fib model code) [16] как для бетона на быстротвердеющем цементе;



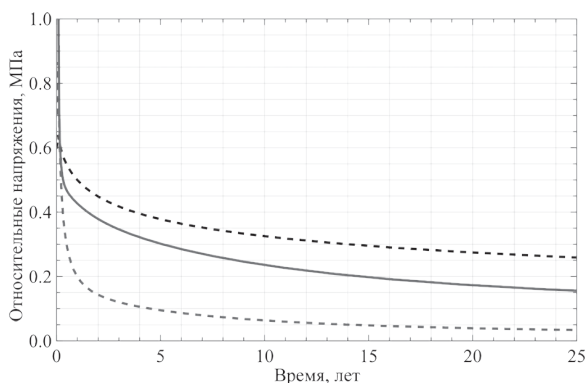
**Рисунок 3** — График тангенциальных напряжений на внутреннем контуре бетонной крепи (расчетная ситуация 1): черная сплошная линия — вариант 1; черная пунктирная линия — вариант 2; серая сплошная линия — вариант 3; серая пунктирная линия — вариант 4

**Figure 3** — Plot of tangential stresses on the inner contour of a concrete lining (case 1): black solid line — option 1; black dashed line — option 2; gray solid line — option 3; gray dashed line — option 4

- вариант 4 — использование функции ползучести  $J(t, t')$ , получаемой через определяющие уравнения меры ползучести  $C(t, t')$  согласно методике рекомендаций НИИЖБ с учетом максимально полной рецептуры с реального объекта подземного строительства.

Для случая бетонной крепи принимается, что для испарения влаги учитывается только поверхность внутреннего контура крепи при относительной влажности воздуха окружающей среды 70 %. В случае комбинированной чугунно-тюбинговой крепи отсутствуют условия испарения и поглощения воды во время твердения цементного камня через внутренний контур крепи.

Важно отметить, что, несмотря на превосходные изолирующие свойства соляных пород, очевидно, что на контакте «бетон — массив соляных пород» в процессе гидратации происходят активные химические процессы вследствие влагопереноса до наступления гигрометрического рав-



**Рисунок 4** — График относительных тангенциальных напряжений на внутреннем контуре бетонной крепи (расчетная ситуация 1): черная пунктирная линия — вариант 2; серая сплошная линия — вариант 3; серая пунктирная линия — вариант 4

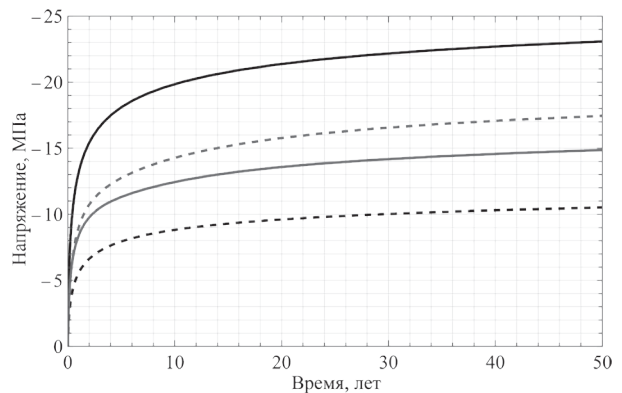
**Figure 4** — Plot of relative tangential stresses on the inner contour of the concrete lining (case 1): black dashed line — option 2; gray solid line — option 3; gray dashed line — option 4

новесия сред на контакте. Тем не менее, данный фактор в работе не учитывается ввиду невозможности достоверного его учета.

**Результаты.** Для первой проектной ситуации выполнено сравнение тангенциальных напряжений на контуре крепи (рисунок 3) и их относительных величин (рисунок 4). При этом за абсолютные приняты напряжения варианта 1, где усадка и ползучесть не учитывается.

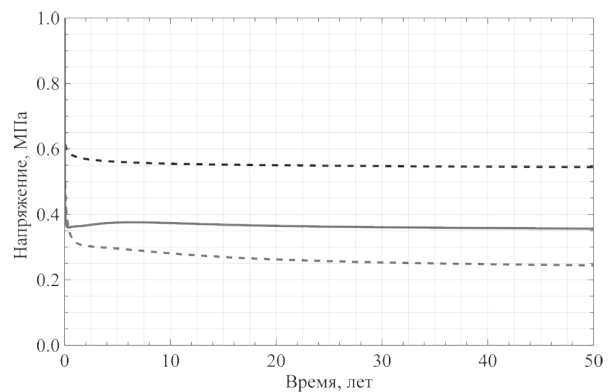
Результаты второй проектной ситуации приведены аналогично в форме тангенциальных напряжений и их относительных величин в бетоне на контакте «тюбинг — бетон» (рисунки 5, 6) и в чугунном тюбинге (рисунки 7, 8).

Сравнительный анализ НДС различных вариантов учета ползучести показывает существенное влияние выбора принятого подхода как на ранних этапах (сопровождения и мониторинга), так и при значительных периодах времени. Последнее объясняется тем, что нагружения конструкций



**Рисунок 5** — График тангенциальных напряжений на внутреннем контуре бетона комбинированной крепи (расчетная ситуация 2): черная сплошная линия — вариант 1; черная пунктирная линия — вариант 2; серая сплошная линия — вариант 3; серая пунктирная линия — вариант 4

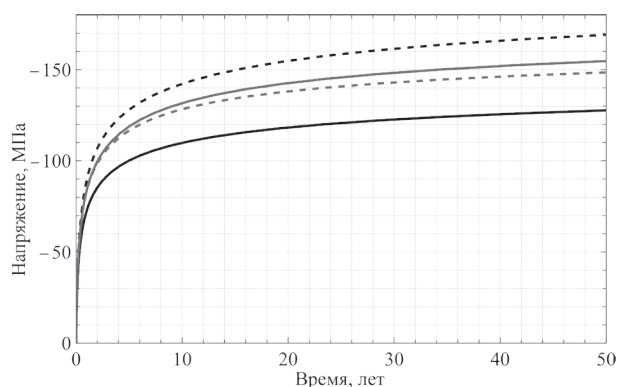
**Figure 5** — Plot of tangential stresses on the inner contour of the concrete of the combined lining (case 2): black solid line — option 1; black dashed line — option 2; gray solid line — option 3; gray dashed line — option 4



**Рисунок 6** — График относительных тангенциальных напряжений на внутреннем контуре бетона комбинированной крепи (расчетная ситуация 2): черная пунктирная линия — вариант 2; серая сплошная линия — вариант 3; серая пунктирная линия — вариант 4

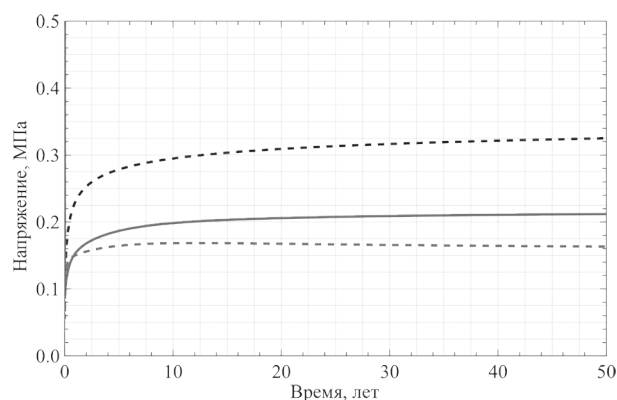
**Figure 6** — Plot of relative tangential stresses on the inner contour of the concrete of the combined lining (case 2): black dashed line — option 2; gray solid line — option 3; gray dashed line — option 4





**Рисунок 7** — График тангенциальных напряжений в чугунном тубинге комбинированной крепи (расчетная ситуация 2): черная сплошная линия — вариант 1; черная пунктирная линия — вариант 2; серая сплошная линия — вариант 3; серая пунктирная линия — вариант 4

**Figure 7** — Plot of tangential stresses in the cast-iron tubing of the combined lining (case 2): black solid line — option 1; black dashed line — option 2; gray solid line — option 3; gray dashed line — option 4



**Рисунок 8** — График относительных тангенциальных напряжений в чугунном тубинге комбинированной крепи (расчетная ситуация 2): черная пунктирная линия — вариант 2; серая сплошная линия — вариант 3; серая пунктирная линия — вариант 4

**Figure 8** — Plot of relative tangential stresses in the cast-iron tubing of the combined lining (case 2): black dashed line — option 2; gray solid line — option 3; gray dashed line — option 4

в соляных породах в рамках инженерных приложений не подчиняются полностью характеру «заданных нагрузок».

**Заключение.** В работе выполнено сравнение различных подходов к проблеме учета явлений усадки и ползучести бетона при строительстве подземных сооружений в массивах соляных пород. С этой целью с использованием численного моделирования выполнено решение задачи исследования НДС крепи шахтного ствола с учетом ползучести бетона и взаимодействия крепи со вмещающим массивом при рассмотрении нелинейного закона поведения массива соляных пород.

В результате модельных исследований установлено значительное влияние способа учета усадки и ползучести бетона на НДС конструкции. При этом учет большего числа технологических факторов также дает значительные отличия в результатах, что обосновывается в целом тенденцией к изменению составов современных

бетонов и в частности характерными отличиями рецептур бетонов, применяемых в подземном строительстве.

При расчетах взаимодействия и взаимного влияния массивов соляных пород и конструкций, выполняемых преимущественно с использованием монолитного бетона, на основании полученных и установленных результатов рекомендуется учитывать явления усадки и ползучести бетона непосредственно через использование функции ползучести  $J(t, t')$  или характеристики ползучести  $\phi(t, t')$  с учетом особенностей рецептуры бетона.

## Список литературы

1. Казикаев, Д.М. Диагностика и мониторинг напряженного состояния крепи вертикальных стволов / Д.М. Казикаев, С.В. Сергеев. — М.: Горная книга, 2011. — 244 с.
2. Тер-Мартirosян, З.Г. К вопросу учета ползучести бетона в грунтовой среде / З.Г. Тер-Мартirosян, В.В. Бахмисов // Вестн. МГСУ. — 2020. — Т. 15, № 9. — С. 1285–1296. — DOI: <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2020.9.1285-1296>.
3. Страданченко, С.Г. Основные направления совершенствования качества крепи вертикальных стволов / С.Г. Страданченко, М.С. Плешко, В.Н. Армейсков // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2010. — № 5. — С. 373–376.
4. Thomas, A. Sprayed concrete lined tunnels / A. Thomas. — CRC Press, 2020. — 308 p. — DOI: <https://doi.org/10.1201/9780429264566>.
5. Creep in shotcrete tunnel shells / Ch. Hellmich [et al.] // IUTAM Symposium on Creep in Structures: Solid Mechanics and its Applications. — Dordrecht: Springer Netherlands, 2001. — Pp. 217–229. — DOI: [https://doi.org/10.1007/978-94-015-9628-2\\_22](https://doi.org/10.1007/978-94-015-9628-2_22).
6. Протосеня, А.Г. Развитие напряженно-деформированного состояния комбинированной крепи вертикального ствола, пройденного в соляном массиве / А.Г. Протосеня, А.М. Катеров // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 6-1. — С. 100–113. — DOI: [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2022\\_61\\_0\\_100](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_61_0_100).
7. Method for predicting the stress-strain state of the vertical shaft lining at the drift landing section in saliferous rocks / M.A. Karasev [et al.] // Journal of Mining Institute. — 2019. — Vol. 240. — Pp. 628–637. — DOI: <https://doi.org/10.31897/rmi.2019.6.628>.
8. Журавков, М.А. Численное моделирование реологических процессов при недостаточном количестве реологических констант / М.А. Журавков, С.Н. Лопатин // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2021. — Т. 8, № 1. — С. 79–85. — DOI: <https://doi.org/10.15372/FPVGN2021080111>.
9. Olovyanny, A.G. Numerical modeling of deformation in a shaft in the interstratified salt rocks / A.G. Olovyanny, A.M. Kozel // Journal of Mining Science. — 2005. — Vol. 41, no. 3. — Pp. 207–214. — DOI: <https://doi.org/10.1007/s10913-005-0085-1>.
10. Urai, J.L. The effect of grain boundary water on deformation mechanisms and rheology of rocksalt during long-term deformation / J.L. Urai, C.J. Spiers // The Mechanical Behavior of Salt — Understanding of THMC Processes in Salt / M. Wallner [et al.] eds. — Hannover: CRC Press, 2007. — Pp. 149–158.
11. Касьянова, И.В. Рекристаллизационная ползучесть хлорида натрия в присутствии водных растворов различного состава: дис. ... канд. хим. наук : 02.00.11 / И.В. Касьянова. — М., 2005. — 132 с.
12. Арутюнян, Н.Х. Расчет строительных конструкций с учетом ползучести / Н.Х. Арутюнян, А.А. Зевин. — М.: Стройиздат, 1988. — 256 с.
13. Gardner, N.J. Design provisions for drying shrinkage and creep of normal strength concrete / N.J. Gardner, M.J. Lockman // ACI Materials Journal. — 2001. — Vol. 98, no. 2. — Pp. 159–167. — DOI: <https://doi.org/10.14359/10199>.
14. Bažant, Z.P. Creep and hygrothermal effects in concrete structures / Z.P. Bažant, M. Jirásek. — Dordrecht: Springer Dordrecht, 2018. — 960 p. — DOI: <https://doi.org/10.1007/978-94-024-1138-6>.

15. Bažant, Z.P. Dirichlet series creep function for aging concrete / Z.P. Bažant, S.T. Wu // Journal of the Engineering Mechanics Division. — 1973. — Vol. 99, no. 2. — Pp. 367–387.
16. Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий = Еўракод 2. Праектаванне жалезабетонных канструкцый. Частка 1-1. Агульныя правылы і правылы для будынкаў: ТКП EN 1992-1-1-2009 (02250) (EN 1992-1-1:2004+AC:2008, IDT). — Введ. 10.12.2009. — Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2010. — 191 с.

KAZLOUSKI Jauheni Ja.

Ph. D. Student of the Theoretical and Applied Mechanics Department<sup>1</sup>

E-mail: jkazlouski@outlook.com

ZHURAVKOV Michael. A., D.Sc. in Phys. and Math., Prof.

Head of the Theoretical and Applied Mechanics Department<sup>1</sup>

E-mail: zhuravkov@bsu.by

<sup>1</sup>Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

Received 12 December 2022.

## SHRINKAGE AND CREEP OF CONCRETE IMPACT ON THE INTERACTION ELEMENTS OF “LINING — SALT ROCK MASS” SYSTEM

*The paper presents a comparison of different approaches to the problem of considering the phenomena of shrinkage and creep of concrete during underground construction in a rock salt mass. The comparison is based on the results of numerical modelling of the stress-strain state of the mine shaft lining. As a result of modelling studies, a significant influence of the method of considering the shrinkage and creep of concrete on the results of calculations has been established, which is especially important given the trends in changing the compositions of modern concrete and the characteristic differences in the formulations of concrete used in underground construction. Based on the results obtained, it is recommended to consider established phenomena with the use of creep functions directly taking into account the features of the formulation and technology.*

**Keywords:** geomechanics, underground structures, salt rocks, creep of concrete, mine shaft

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2023-1-62-95-100>

### References

1. Kazikaev D.M., Sergeev S.V. *Diagnostika i monitoring napryazhennogo sostoyaniya krepki vertikalnykh stvolov* [Diagnostics and monitoring of the stress state of the lining of vertical shafts]. Moscow, Gornaya kniga Publ., 2011. 244 p. (in Russ.).
2. Ter-Martirosyan Z.G., Bakhmisov V.V. K voprosu ucheta polzuchesti betona v gruntovoy srede [To the question of concrete creep in the soil environment]. *Vestnik MGSU*, 2020, vol. 15, no. 9, pp. 1285–1296. DOI: <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2020.9.1285-1296> (in Russ.).
3. Stradanchenko S.G., Pleshko M.S., Armeyskov V.N. Osnovnye napravleniya sovershenstvovaniya kachestva krepki vertikalnykh stvolov [The main directions for improving the quality of lining of vertical shafts]. *Mining informational and analytical bulletin*, 2010, no. 5, pp. 373–376 (in Russ.).
4. Thomas A. *Sprayed concrete lined tunnels*. CRC Press, 2020. 308 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780429264566>.
5. Hellmich Ch., Lechner M., Lackner R., Macht J., Mang H.A. Creep in shotcrete tunnel shells. *IUTAM Symposium on creep in structures: Solid mechanics and its applications*, 2001, pp. 217–229. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-94-015-9628-2\\_22](https://doi.org/10.1007/978-94-015-9628-2_22).
6. Protosenja A.G., Katerov A.M. Razvitiye napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya kombinirovannoy krepki vertikalnogo stvola, proydennogo v solyanom massive [Development of stress and strain state of combined support for a vertical shaft driven in salt massif]. *Mining informational and analytical bulletin*, 2022, no. 6-1, pp. 100–113. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2\_022\_61\_0\_100 (in Russ.).
7. Karasev M.A., Buslova M.A., Vilner M.A., Nguyen T.T. Method for predicting the stress-strain state of the vertical shaft lining at the drift landing section in saliferous rocks. *Journal of Mining Institute*, 2019, vol. 240, pp. 628–637. DOI: <https://doi.org/10.31897/pmi.2019.6.628>.
8. Zhuravkov M.A., Lopatin S.N. Chislennoe modelirovaniye reologicheskikh protsessov pri nedostatochnom kolichestve reologicheskikh konstant [Numerical modeling of rheological processes at insufficient number of rheological constants]. *Fundamental and applied issues of mining*, 2021, vol. 8, no. 1, pp. 79–85. DOI: <https://doi.org/10.15372/FPVGN2021080111> (in Russ.).
9. Olovyanny A.G., Kozel A.M. Numerical modeling of deformation in a shaft in the interstratified salt rocks. *Journal of mining science*, 2005, vol. 41, no. 3, pp. 207–214. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10913-005-0085-1>.
10. Urai J.L., Spiers C.J. The effect of grain boundary water on deformation mechanisms and rheology of rocksalt during long-term deformation. *The mechanical behavior of salt — understanding of THMC processes in salt*, 2007, pp. 149–158.
11. Kasyanova I.V. *Rekristallizatsionnaya polzuchest khlorida natriya v prisutstvii vodnykh rastvorov razlichnogo sostava*. Diss. kand. khim. nauk (Recrystallization creep of sodium chloride in the presence of aqueous solutions of various compositions. Ph. D. Thesis). Moscow, 2005. 135 p. (in Russ.).
12. Arutyunyan N.Kh., Zevin A.A. *Raschet stroitelnykh konstruktсий s uchedom polzuchesti* [Calculation of civil engineering structures taking into account creep]. Moscow, Strojizdat Publ., 1988. 256 p. (in Russ.).
13. Gardner N.J., Lockman M.J. Design provisions for drying shrinkage and creep of normal strength concrete. *ACI Materials journal*, 2001, vol. 98, no. 2, pp. 159–167. DOI: <https://doi.org/10.14359/10199>.
14. Bažant Z.P., Jirásek M. *Creep and hygrothermal effects in concrete structures*. Dordrecht, Springer Dordrecht, 2018. 960 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-94-024-1138-6>.
15. Bažant Z.P., Wu S.T. Dirichlet series creep function for aging concrete. *Journal of the engineering mechanics division*, 1973, vol. 99, no. 2, pp. 367–387.
16. Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций. Част 1-1. Общечие правила и правила для зданий [Design of concrete structures. Part 1-1. General rules and rules for buildings]. Minsk, Ministerstvo arkhitektury i stroitelstva Respubliki Belarus Publ., 2010. 191 p. (in Russ.).