

Оригинальная статья

УДК 502/504: 627.82:691.11

DOI: 10.26897/1997-6011-2021-5-85-90

## КИНЕТИКА ГИДРАТАЦИИ ЦЕМЕНТА, ПЛАСТИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ БЕТОНА ОБЛИЦОВКИ КАНАЛА И ЕЕ ТЕРМОНАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ

**ЖАРНИЦКИЙ ВАЛЕРИЙ ЯКОВЛЕВИЧ**<sup>✉</sup>, д-р техн. наук, профессор  
zharnitskiy@mail.ru

**КОРНИЕНКО ПАВЕЛ АЛЕКСАНДРОВИЧ**<sup>✉</sup>, заведующий лабораторией  
kornienko.p.a@mail.ru

<sup>1</sup> Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, г. Москва, Тимирязевская ул., 49, Россия

*Представленные результаты исследований свидетельствуют о том, что развитие технологии укладки монолитного бетона при различных температурно-влажностных условиях внешней среды связано с ускорением процесса твердения свежесуложенного бетона и приобретения им необходимой прочности до достижения опасных величин влагопотерь и замораживания. Только в этом случае может быть обеспечено получение качественного материала с высокими потенциально возможными свойствами. Исследования проводились в изотермических условиях при разных температурах. Полученные данные позволяют произвести расчет температурных полей бетона, возникающих за счет экзотермии цемента в нестационарных режимах. Облицовка канала рассматривается как неограниченная в горизонтальном направлении изотропная плита, лежащая на сплошном грунтовом основании. При решении задачи приняты следующие предпосылки: температурный режим в облицовке и подстилающем слое грунта меняется по затухающей гармонической функции; на термонапряженное состояние облицовки влияет ползучесть бетона. Вследствие этого исследование вопроса кинетики тепловыделения цемента при гидратации его в различных температурных условиях представляется важным и необходимым, особенно для укладки монолитного бетона в облицовки каналов.*

**Ключевые слова:** облицовка канала, температурно-влажностные условия, ползучесть бетона, гидратация, прочность, водопроницаемость, морозостойкость, экзотермия цемента, термонапряжение

**Формат цитирования:** Жарницкий В.Я., Корниенко П.А. Кинетика гидратации цемента, пластическая прочность бетона облицовки канала и ее термонапряженное состояние // Природообустройство. – 2021. – № 5. – С. 85-90. DOI: 10.26897/1997-6011-2021-5-85-90.

© Жарницкий В.Я., Корниенко П.А., 2021

Original article

## KINETICS OF CEMENT HYDRATION, PLASTIC STRENGTH OF CONCRETE OF CHANNEL CLADDING AND ITS THERMAL STRESS STATE

**ZHARNITSKY VALERY YAKOVKEVICH**<sup>✉</sup>, doctor of technical sciences, professor  
zharnitskiy@mail.ru

**KORNIENKO PAVEL ALEKSANDROVICH**<sup>✉</sup>, head of the laboratory  
kornienko.p.a@mail.ru

Russian state agrarian university – MAA named after C.A. Timiryazev: 127434, Moscow, Timiryazevskaya, 49, Russia

*The presented research results show that the development of the technology of laying monolithic concrete under various temperature and humidity conditions of the external environment is associated with the acceleration of the hardening process of freshly laid concrete*

and the acquisition of the necessary strength before reaching dangerous values of moisture loss and freezing. Only in this case can a high-quality material with high potential properties be obtained. The studies were carried out under isothermal conditions at different temperatures. The obtained data allow us to calculate the temperature fields of concrete that arise due to the exothermy of cement in non-stationary modes. The lining of the channel is considered as an isotropic plate unlimited in the horizontal direction, lying on a solid ground base. When solving the problem, the following prerequisites are accepted: – the temperature regime in the lining and the underlying layer of the soil changes according to the damped harmonic function; – the thermal stress state of the cladding is affected by the creep of the concrete. As a result, the study of the kinetics of heat emission of cement during its hydration under various temperature conditions is important and necessary, especially for laying monolithic concrete in the lining of channels.

**Keywords:** channel cladding, temperature and humidity conditions, concrete creep, hydration, strength, water resistance, frost resistance, cement exothermy, thermal stress

**Format of citation:** Zharnitsky V.Ya., Kornienko P.A. Kinetics of cement hydration, plastic strength of concrete of channel cladding and its thermal stress state // Prirodoobustroystvo. – 2021. – No 5. – S. 85-90. DOI: 10.26897/1997-6011-2021-5-85-90.

**Введение.** Отрицательное воздействие неблагоприятных климатических условий на твердеющий бетон особенно усугубляется при строительстве протяженных сооружений с большим модулем открытой поверхности, к которым относятся облицовки каналов водохозяйственного назначения.

Для получения качественных и долговечных конструкций в любых погодных климатических условиях и при любых параметрах внешней среды при укладке монолитного бетона требуется обеспечение благоприятных температурно-влажностных условий для его твердения, обеспечивающих нужную степень гидратации цемента, формирование плотной и долговечной структуры цементного камня и бетона, достижение бетоном требуемой прочности, водонепроницаемости и морозостойкости и последующее повышение этих показателей в благоприятных условиях, а также предотвращение значительных температурно-усадочных деформаций и образования трещин.

Исследования свидетельствуют о том, что развитие технологии укладки монолитного бетона при различных температурно-влажностных условиях внешней среды связано с ускорением процесса твердения свежесушеного бетона и приобретения им необходимой прочности до достижения опасных величин влагопотери и замораживания. Только в этом случае может быть обеспечено получение качественного материала с высокими потенциально возможными свойствами.

### Материалы и методы исследований.

Практика бетонирования при пониженных температурах показывает, что экзотермические процессы при гидратации цемента существенно сказываются на выборе и расчетах температурных режимов для ускоренного твердения бетона монолитных конструкций. Учет теплоты гидратации позволяет в ряде случаев (до 40%) существенно сократить расход энергии на прогрев бетона. Кроме того, это дает возможность обеспечить более благоприятные условия твердения с точки зрения термонапряженного состояния конструкции. Вследствие этого исследование вопроса кинетики тепловыделения цемента при гидратации его в различных температурных условиях представляется важным и необходимым, особенно для укладки монолитного бетона в облицовки каналов [1-5, 7, 8].

Исследования проводились в изотермических условиях при температурах 273°K, 283°K, 293°K, 313°K и 333°K (табл. 1, рис. 1).

Полученные данные позволяют произвести расчет температурных полей бетона, возникающих за счет экзотермии цемента в нестационарных режимах. В этих расчетах используется полученная эмпирически температурная функция, аппроксимирующаяся показательной функцией:

$$f_t = 1,5 \cdot \frac{t - t_0}{\varepsilon}, \quad (1)$$

где  $f_t$  – температурная функция;  $t$  – температура процесса, °K;  $t_0$  – базовая температура (293°K), °K;  $\varepsilon$  – характерная температурная разность, °K.

**Кинетика тепловыделения цемента при гидратации его  
в различных температурных условиях**

Table 1

**Kinetics of cement heat generation during its hydration  
under different temperature conditions**

Время гидратации, часы <i>Hydration time, hours hydration, hours</i>	Кинетика изотермии гидратации <i>КДж/кг</i> при температуре внешней среды $^{\circ}K$ <i>Kinetics of hydration isothermy <math>KJ/kg</math> at ambient temperature <math>^{\circ}K</math></i>				
10	4	14	28	96	153
20	9	30	74	166	212
30	16	44	122	203	234
40	18	60	154	224	242
50	24	86	164	230	246
60	28	104	180	236	243
70	32	124	188	240	254
80	38	138	192	244	254
90	46	150	200	246	254
100	54	160	206	248	256

**Результаты исследований.** Для портландцементов установлена закономерность изменения  $\varepsilon$  в зависимости от степени завершения процесса тепловыделения  $L = Q/Q_{28} \cdot 100, \%$ :

$$0 < L < 30$$

$$\varepsilon = 6,2 + 0,095(t - 293) - 0,077 \cdot L; \quad (2)$$

$$30 < L < L^{\phi}$$

$$\varepsilon = 3,89 + 0,095(t - 293) - 0,075(L - 30); \quad (3)$$

$$L^{\phi} < L < 80$$

$$\varepsilon = 3,89 + 0,095(t - 293) + 0,075(L^{\phi} - 30) - 0,059(L - L^{\phi}), \quad (4)$$

где  $L^{\phi} = 48,8 - 0,18 \cdot V$  (здесь  $V$  – содержание фракций диаметром  $d = 40 \dots 60$  мкм в исходном цементе, %).

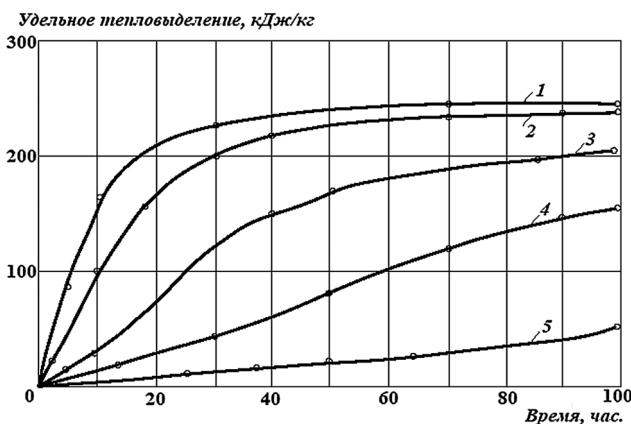


Рис. 1. Удельное тепловыделение бетонной смеси:

1 – 333°K; 2 – 313°K; 3 – 293°K; 4 – 283°K; 5 – 273°K

Fig. 1. Specific heat emission of concrete mixture:  
1 – 333°K; 2 – 313°K; 3 – 293°K; 4 – 283°K; 5 – 273°K

При знании кинетики тепловыделения цемента при базовой температуре  $t_o = 293^{\circ}K$  прогнозирование процесса при другой температуре  $t$  производится по формуле:

$$Q(t, \tau) = Q \cdot (t_o, \tau \cdot 1,5^{\frac{t-293}{\varepsilon}}), \quad (5)$$

то есть тепловыделение при температуре  $t$  в момент времени  $\tau$  равно тепловыделению при базовой температуре  $t_o$ , но в момент времени

$$\tau_o = \tau \cdot 1,5^{\frac{t-t_o}{\varepsilon}}.$$

При дальнейшем изменении температуры тепловыделение за время  $\Delta\tau$ , за которое произошло это изменение, будет определяться как

$$\Delta Q = Q \left[ t_o; \left( \tau \cdot 1,5^{\frac{t-293}{\varepsilon}} + \Delta\tau \cdot 1,5^{\frac{(t+\Delta)-293}{\varepsilon}} \right) \right] - Q \left( t_o; \tau \cdot 1,5^{\frac{t-293}{\varepsilon}} \right). \quad (6)$$

Для зависимостей (5) и (6) значение  $\varepsilon$  определяется по одной из формул: (2), (3) или (4).

Для всесторонней оценки влияния режимов тепловой обработки на проведение бетона, особенно на ранних стадиях твердения, большую роль играют данные по изменению пластической прочности. Имея данные по пластической прочности, можно прогнозировать прочность бетона на сжатие и определять, таким образом, время, когда на его поверхность можно укладывать утеплитель [2-6].

Результаты эксперимента по определению изменения пластической прочности при температурах 293°K, 313°K и 333°K представлены

на рисунке 2, где приведено сопоставление данных, полученных на растворе и растворной части бетона при 293°K.

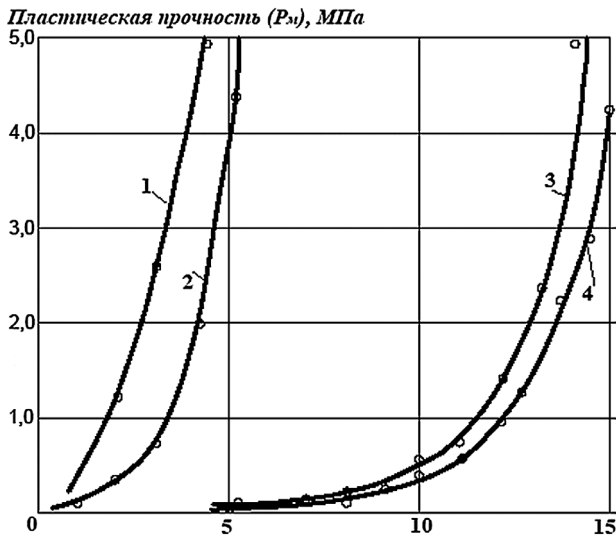


Рис. 2. Изменение пластической прочности раствора при различных температурах твердения:

1 – 333°K; 2 – 313°K; 3 и 4 – 293°K;  
1, 2, 4 – раствор; 3 – растворная часть бетона

Fig. 2. Change of plastic strength of the solution at different hardening temperatures:

1 – 333°K; 2 – 313°K; 3 and 4 – 293°K;  
1, 2, 4 – solution; 3 – mortar part of concrete

Как следует из рисунка 2, спустя 10 ч пластическая прочность растворной части выше, чем раствора. Данное обстоятельство объясняется тем, что в бетоне часть воды затворения идет на смачивание крупного заполнителя.

По данным рисунка 2 представляется возможным прогнозировать изменение прочности бетона и определять значение характерной температурной разности  $\varepsilon_m$ :

$$\varepsilon_t = 2,5 + 0,5 \cdot (t - 293), \quad (7)$$

где  $t$  – температура твердения, °K.

Переход от значения пластической прочности к прочности на сжатие производится по формуле:

$$R_{сж}^0 = K \cdot P_m, \quad (8)$$

где  $R_{сж}^0$  – прочность бетона на сжатие в раннем возрасте, МПа;  $P_m$  – пластическая прочность смеси, МПа;  $K$  – коэффициент перевода от пластической прочности смеси к прочности бетона на сжатие в зависимости от вида цемента, вида и количества добавок, вводимых в бетонную смесь.

Температурные градиенты могут приводить к значительным температурным деформациям и термонапряжениям, оценка которых необходима для обеспечения долговечности и эксплуатационной надежности облицовок. Кроме того, оценка термонапряжений важна при применении ТВП для форсированного теплового воздействия на бетон монолитных бетонных облицовок в процессе их устройства [2-7].

Облицовка канала рассматривается как неограниченная в горизонтальном направлении изотропная плита, лежащая на сплошном грунтовом основании.

При решении задачи приняты следующие предпосылки:

- температурный режим в облицовке и подстилающем слое грунта меняется по затухающей гармонической функции;
- на термонапряженное состояние облицовки влияет ползучесть бетона.

Для учета влияния ползучести бетона на термонапряженное состояние облицовки можно принять функцию релаксации напряжений Александровского [2-6, 8]. Тогда полные напряжения  $\sigma_n$  в момент наблюдения  $\hat{\tau}$  –

$$\sigma_n(\hat{\tau}) = \sigma(\hat{\tau}) - \int_{\tau_0}^{\hat{\tau}} \varepsilon(\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} P(\hat{\tau}, \tau) d\tau, \quad (9)$$

где  $\sigma_n(\hat{\tau}) = \sigma(\hat{\tau})E$  – упруго-мгновенные напряжения в момент наблюдения;  $\varepsilon(\tau)$  – относительная деформация в момент времени  $t$ ;  $\tau_0$  – момент первого температурного воздействия;  $E$  – модуль упругости бетона;  $P(\hat{\tau}, \tau) = EH(\hat{\tau}, \tau)$  – функция релаксации напряжений Александровского;  $H$  – коэффициент затухания, значения которого могут быть приняты по данным Арутюняна [2-6, 8] по таблице 2.

### Значения коэффициента затухания (H)

Таблица 2

#### Attenuation coefficient values (N)

Table 2

Момент наблюдения, час. Moment of observation, hour									
Значение коэф-та H Value of the coefficient H									

Согласно Лыкову [2-6] температурное поле в однородном полупространстве может быть описано уравнением:

$$v(\tau, z) = v_{cp} \cdot e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} \cdot z} \cdot \cos\left(\omega\tau - \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} \cdot z\right), \quad (10)$$

где  $v$  – значение амплитуды температуры поля в момент времени на глубине  $z$ ;  $v_{cp}$  – средняя величина амплитуды температуры температурного поля;  $\omega$  – циклическая частота;  $\alpha$  – коэффициент теплопроводности бетона.

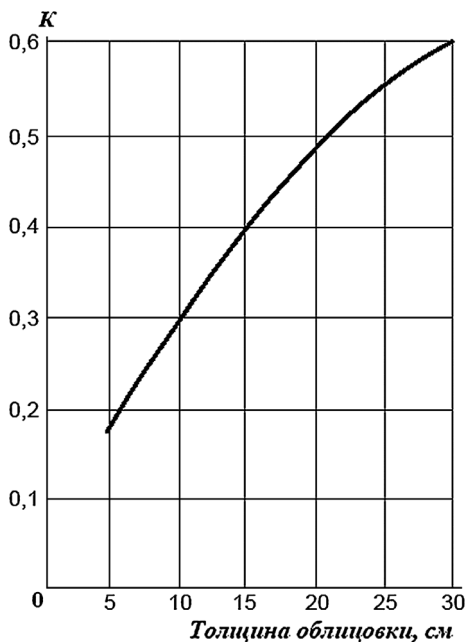


Рис. 3. График для определения коэффициента  $K$ , учитывающего работу облицовок и основания, в зависимости от толщины облицовки

Fig. 3. Graph for determining the coefficient  $K$ , taking into account the work of the cladding and base, depending on the thickness of the cladding

#### Библиографический список

1. Жарницкий В.Я., Корниенко П.А. Обоснование линейной математической модели сдвигового течения бетонной смеси под действием силы тяжести по наклонной поверхности откоса // Природообустройство. – 2020. – № 1. – С. 88-93.
2. Борделяну Г.В. Экспериментально-статистические исследования деформаций ползучести заводского бетона с построением математических моделей второго порядка для их влияния прогнозирования: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / Кишиневский политехнический институт им. С. Лаза. – Кишинев, 1974. – 23 с.
3. Васильев П.И. Некоторые вопросы ползучести бетона: Автореф. дис. ... д-ра техн.

Величина термонапряжения может быть принята прямо пропорциональной значению амплитуды температуры ( $v$ ). Максимальных значений термонапряжения достигает: при  $\cos \omega\tau = \pm 1$  и  $z = 0$ . Тогда с учетом релаксации напряжений за счет ползучести бетона величина этих напряжений может быть определена из выражения:

$$\sigma_{max} = \frac{a \cdot E}{1 + m} \cdot v \cdot K, \quad (11)$$

где  $m$  – параметр, учитывающий влияние ползучести бетона  $m = 1 - H$ , здесь  $H$  принимается по таблице 2;  $K$  – коэффициент, учитывающий совместную работу облицовок и основания, значение которого может быть принято по рисунку 3, в зависимости от толщины облицовки;  $v$  – величина температурного периода;  $a$  – коэффициент температурного расширения бетона;  $E$  – модуль упругости бетона.

Значение термонапряжений не должно превышать величины расчетного сопротивления бетона растяжению. При этом коэффициент условий работы следует принимать не более 0,8 с учетом неоднородности бетона.

#### Выводы

Зная кинетику тепловыделения цемента при базовой температуре  $t = 293^\circ K$ , можно прогнозировать процесс тепловыделения при любой другой температуре.

Для всесторонней оценки влияния режимов тепловой обработки на поведение бетона большую роль оказывают данные по изменению его пластической прочности. Имея данные по пластической прочности, можно прогнозировать прочность бетона на сжатие.

На термонапряженное состояние облицовки влияет ползучесть бетона, которую можно учитывать через функцию релаксации термонапряжений.

#### References

1. Zharnitsky V.Ya., Kornienko P.A. Obosnovanie linejnoy matematicheskoy modeli sdvigoogo techeniya betonnoy smesi pod dejstviem sily tyazhesti po naklonnoj poverhnosti otkosa // Prirodoobustrojstvo. – 2020. – № 1. – S. 88-93.
2. Bordelyanu G.V. Experimentalno – statisticheskie issledovaniya deformatsij polzuchestti zavodskogo betona s postroeniem matematicheskikh modelej vtorogo poryadka dlya ih vliyaniya prognozirovaniya. / Avtoreferat dis na soiskanie uchenoj stepeni kand. tehn. nauk. (05.23.01) / Kishinev. politehn. in-t im. S. Lazo. – Kishinev: 1974. – 23 s.
3. Vasiljev P.I. Nekotorye voprosy polzuchesti betona. / Avtoreferat dis na soiskanie

наук / МВ и ССО РСФСР. Ленинградский политехнический институт им. М.И. Калинина. – Л., 1963. – 29 с.

4. **Карапетыан К.С.** Экспериментальное исследование ползучести бетона: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Ленинградский политехнический институт им. М.И. Калинина. – Л., 1967. – 34 с.

5. **Корниенко П.А., Прозоровский А.Г., Сабодаш П.Ф.** Об учете массовых сил в расчетах плоско-параллельного слоя бетонной смеси на наклонном грунтовом массиве // Материалы научно-технической конференции. – М.: МГУП, 2000. – С. 93-94.

6. **Стрелков Г.П.** Некоторые вопросы природы ползучести бетона: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Харьков, 1968. – 16 с.

7. **Грозав В.И., Кулиев К.А.** Интенсификация бетонирования монолитных облицовок каналов // Материалы научно-технической конференции. – М.: МГУП, 2001. – 85 с.

8. **Вайнберг А.И.** Решение динамических задач оползневого сдвига // Гидротехническое строительство. – 2002. – Вып. 5. – С. 24-28.

9. **Алтунин В.С.** Защитные покрытия оросительных каналов / В.А. Бородин, В.Г. Ганчиков, Ю.М. Косиченко и др. / Под ред. В.С. Алтунина. – М.: Агропромиздат, 1988. – 158 с.

10. **Галустов К.З.** Развитие теории ползучести бетона и совершенствование методов расчета железобетонных конструкций: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Центр. науч.-исслед. и проект. ин-т жилых и обществ. зданий. – М., 2008. – 47 с.

#### Критерии авторства

Жарницкий В.Я., Корниенко П.А. выполнили теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов

Статья поступила в редакцию 17.06.2021 г.

Одобрена после рецензирования 18.10.2021 г.

Принята к публикации 01.11.2021 г.

uchenoj stepeni doktora tehn. nauk. / MV I SSO RSFSR. Leningr. politehn. in-t im. M.I. Kalinina. – L.: 1963. – 29 s.

4. **Karapetyan K.S.** Experimentalnoe issledovanie polzuchesti betona. Avtoreferat dis na soiskanie uchenoj stepeni doktora tehn. nauk / Leningr. politehn. in-t im. M.I. Kalinina. – Leningrad: [b. i.], 1967. – 34 s.

5. **Kornienko P.A., Prozorovsky A.G., Sabodash P.F.** Ob uchete massovyh sil v raschetah plosko – parallelnogo sloya betonnoj smesi na naklonnom gruntovom massive. // Mat-ly nauchno-tehn. konf. – M.: MGUP, 2000. – S. 93-94.

6. **Strelkov G.P.** Nekotorye voprosy prirody polzuchesti betona: avtoreferat-dis...kand. tehn. nauk. – Kharkov: 1968. – 16 s.

7. **Grozav V.I., Kuliev K.A.** Intensifikatsiya betonirovaniya monolitnyh oblitsovok kanalov. / Mat-ly nauchno-tehn. konf. – M.: MGUP, 2001. – 85 s.

8. **Vainberg A.I.** Reshenie dinamicheskikh zadach opolzneвого sдвига // Gidrotehnicheskoe stroitelstvo. – 2002. – Vyp. 5. – S. 24-28.

9. **Altunin V.S.** Zashchitnye pokrytiya ororsitelnyh kanalov / Borodin V.A., Ganchikov V.G., Kosichenko Yu.M. i dr. Pod red. V.S. Altunina. M.: Agropromizdat, 1988. – 158 s.

10. **Galustov K.Z.** Razvitie teorii polzuchesti betona i sovershenstvovanie metodov rascheta zhelezobetonnyh konstruktsij: avtoreferat dis. ... doktora tehnikeskikh nauk: 05.23.01 / Galustov Konstantin Zaharovich; [Mesto zashchity: Tsentr. nauch.-issled. i projekt. in-t zhilyh i obshchestv. zdaniy]. – M.: 2008. – 47 s.

#### Criteria of authorship

Zharnitsky V.Ya., Kornienko P.A. carried out theoretical studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript, have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.

#### Conflict of interests

The authors state that there are no conflicts of interests

The article was submitted to the editorial office 17.06.2021

Approved after reviewing 18.10.2021

Accepted for publication 01.11.2021