

УДК 693.5

DOI [10.37153/2618-9283-2022-3-63-75](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2022-3-63-75)

## **Проектирование, строительство и реконструкция сейсмостойких зданий и сооружений**

### **Обеспечение безопасности и надёжности каналов с облицовкой из бетона на местных заполнителях**

**Васильева Е.В.<sup>1</sup>, Фёдоров В.М.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Южно-Российский государственный политехнический университет им. М.И. Платова.  
Новочеркасск, Российская Федерация

<sup>2</sup>Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт имени А. К. Кортунова – филиал  
Донского государственного аграрного университета.  
Новочеркасск, Российская Федерация

**Аннотация:** Статья посвящена проблеме обеспечения безопасности окружающей среды. Предложены технологические меры по предотвращению экологического ущерба компонентам окружающей среды, за счет снижения потерь на фильтрацию при транспортировке воды по каналам водохозяйственных систем в нормальных условиях эксплуатации и при сейсмических воздействиях. Большинство каналов на территории Ростовской области находится в неудовлетворительном состоянии, что приводит к подъему уровня грунтовых вод, засолению и заболачиванию прилегающих земель, подтоплению территорий, загрязнению мест проживания и снижению уровня жизни населения, разрушению структуры почвы, водной эрозии и смыву. Предложенные облицовки для каналов, выполненные из бетона на недорогих местных заполнителях, отвечают требованиям безопасности, сейсмостойкости и ресурсосбережения. Достигается это принудительным уплотнением бетонных смесей, на заполнителях с повышенным содержанием загрязняющих частиц, путем их (смесей) прессования или (и) укатки при производстве плит и устройстве облицовки, а дополнительный прирост прочностных и эксплуатационных свойств бетона, направленный, в том числе, и на снижение сейсмической реакции, обеспечивается снижением начального водосодержания смесей, посредством добавления в её состав пластификатора формиатно-спиртового.

Рекомендованные авторами меры, позволят значительно снизить потери подаваемой потребителям воды как в нормальных так и экстремальных условиях эксплуатации, предотвратить подтопление и загрязнение прилегающих территорий, улучшить условия жизни населения, остановить деградацию почв.

**Ключевые слова:** безопасность, надежность, сейсмостойкость, заболачивание, подтопление, экологический ущерб, облицовки каналов, бетон, прочность, заполнители

**Для цитирования:** Васильева Е.В., Фёдоров В.М. Обеспечение безопасности и надёжности каналов с облицовкой из бетона на местных заполнителях // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2022. №3.С.63–75

DOI: [10.37153/2618-9283-2022-3-63-75](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2022-3-63-75)

@ Е.В. Васильева, В.М. Фёдоров, 2022

## ***Design, building and reconstruction of a seismic constructions***

### **Ensuring the safety and reliability of channels lined with concrete on local aggregates**

**Elena V. Vasilyeva<sup>1</sup>, Viktor M. Fedorov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>South Russian State Polytechnic University named after M.I. Platov.  
Novocherkassk, Russian Federation

<sup>2</sup>Novocherkassk Engineering and Reclamation Institute named after A.K. Kortunov – branch  
of Don State Agrarian University.  
Novocherkassk, Russian Federation

**Abstract:** The article is devoted to the problem of ensuring the safety of the environment. Technological measures are proposed to prevent environmental damage to environmental components by reducing filtration losses during water transportation through the channels of water management systems under normal operating conditions and under seismic effects. Most of the canals in the Rostov region are in poor condition, which leads to a rise in the level of groundwater, salinization and waterlogging of adjacent lands, flooding of territories, pollution of places of residence and a decrease in the standard of living of the population, destruction of the soil structure, water erosion and washout. The proposed linings for channels, made of concrete on inexpensive local aggregates, meet the requirements of safety, seismic resistance and resource saving. This is achieved by forced compaction of concrete mixtures, on aggregates with a high content of polluting particles, by pressing them (mixtures) and (and) rolling in the production of slabs and cladding, and an additional increase in the strength and performance properties of concrete, directed, including including, and to reduce the seismic response, is provided by a decrease in the initial water content of mixtures by adding a formiate-alcohol plasticizer to its composition. The measures recommended by the authors will significantly reduce the loss of water supplied to consumers both under normal and extreme operating conditions, and prevent flooding and pollution of adjacent areas. Improve the living conditions of the population, stop soil degradation.

**Keywords:** safety, reliability, seismic resistance, swamping, flooding, environmental damage, channel linings, concrete, strength, aggregates

**For citation:** Vasilyeva E.V., Fedorov V.M. Ensuring the safety and reliability of channels lined with concrete on local aggregates [*Seismostoikoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii* = *Earthquake engineering. Constructions Safety*], 2022, no. 3, pp.63–75,

**DOI:** [10.37153/2618-9283-2022-3-63-75](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2022-3-63-75)

**Введение.** Безопасность, надёжность и сейсмостойкость каналов водохозяйственных систем в значительной степени зависят от их технического состояния. В настоящее время большинство из них, построенных и введенных в эксплуатацию в 50–70 годы прошлого столетия, находится в неудовлетворительном состоянии. В первую очередь, это касается каналов распределительной сети, протяженность которых измеряется тысячами километров. Только на Юге России протяженность таких каналов достигает 70 тыс. км и, в основном, выполнены они в земляных руслах, имея низкие показатели КПД и эксплуатационной надёжности. Так, например, Азовская система, введенная в эксплуатацию в 1952 году, имеет КПД сети – 0,46, Багаевско-Садковская – 0,54, Нижне-Донская и Мартыновская – 0,55, Манычская – 0,57, и т.д. В результате больш-

ших (около 50%) потерь транспортируемой воды происходят многочисленные экологические нарушения в виде подъема уровня грунтовых вод, засоления и заболачивания прилегающих земель на всей протяженности сети [1-3]. Из-за подтопления территорий и земельных массивов ухудшается и состояние близлежащих населенных пунктов, происходит загрязнение мест проживания и водоисточников, существенно влияющее на хозяйственную деятельность, уровень и комфортность жизни населения. Необратимые негативные процессы наблюдаются и в почве – разрушение структуры и агрегатности, осолонцевание, уменьшение содержания гумуса, образование закисного железа и оглеение, изменение состава обменных катионов, водная эрозия и смыв почвы, изменение рН, концентрации соды, токсичных газов в приземном слое, что может вызвать отравление у растений [2–5]. Для безопасной и надежной работы каналов водохозяйственных систем и минимизации, таким образом, экологического ущерба (вреда) компонентам окружающей среды, необходимо выполнение каналов в облицованных руслах. Наиболее эффективными и надежными признаны бетонные облицовки сборной и монолитной конструкции. В сравнении с другими они имеют больший срок службы, большую надежность и эффективность [6–8]. Учитывая масштаб проблемы, необходимы большие объемы бетона и бетонных работ. Поэтому, облицовки каналов следует выполнять не только качественно и надежно, но и сравнительно экономично, а значит, с использованием ресурсосберегающих технологий. Производство бетонных работ требует добычи, переработки и транспортировки большого количества минерального сырья. В условиях рыночной экономики затраты на эти работы должны быть минимизированы, так как основной задачей строительства, и водохозяйственного строительства в частности, является возведение объектов с наименьшими затратами. Как уже отмечалось, эта задача может быть решена с применением ресурсосберегающих технологий, позволяющих наряду с другими решать и вопросы использования в качестве сырья дешевых местных строительных материалов. Практически повсеместно имеются крупные месторождения некондиционных (по степени загрязнения пылевидными и глинистыми частицами) нерудных полезных ископаемых, которые сегодня рассматриваются, в том числе и как дополнительные источники сырья с целью получения заполнителей для бетона, который, по всей видимости, останется основным строительным материалом и в 21 веке [9–13].

На территории Южного федерального округа и, прежде всего, Ростовской области, к числу наиболее востребованных относятся нерудные материалы Потаповского, Быстрореченского и Жирновского месторождений. Щебень и высевка (отход дробления) из каменных пород этих месторождений пользуются наибольшим спросом в качестве заполнителей для бетона. И, если массовый спрос на щебень и высевку последних двух месторождений в обозримом будущем сомнений не вызывает, то перспективы щебня и высевки Потаповского месторождения, несмотря на их относительную дешевизну, не столь очевидны. И связано это, главным образом, с повышенным содержанием отрицательно влияющих на свойства бетона пылевидных и глинистых частиц, которых, в щебне и высевке Потаповского месторождения содержится в количестве, соответственно, 6,7% и 18,4% [12–14]. Поэтому, для обеспечения требуемых (или повышенных, при необходимости) прочностных и эксплуатационных свойств бетона, стремятся к использованию заполнителей с заметно меньшим содержанием пылевидных и глинистых частиц. Если по организационным, технологическим или каким-то иным причинам использование на практике таких (качественных) заполнителей не представляется возможным, то невысокое качество заполнителей компенсируют перерасходом цемента, что, во-первых, недопустимо, а во-вторых, ведет к удорожанию продукции [13,14].

Важным обстоятельством является и то, что в отличие от песков, обладающих относительно гладкой поверхностью и дающих подвижные и хорошо уплотняемые бетонные смеси, высевки, с повышенным содержанием пылевидных и глинистых частиц, не обеспечивают требуемой удобоукладываемости бетонной смеси и ее уплотнения при вибрировании, что отрицательным образом сказывается на прочностных и эксплуатационных свойствах бетона. Поэтому, в этих условиях увеличивают начальное водосодержание смеси, приводящее, однако, к перерасходу цемента, либо ищут другой, более эффективный способ уплотнения бетонной смеси [14].

**Цель работы.** Предотвращение экологического ущерба компонентам окружающей среды путем снижения потерь воды на фильтрацию за счет использования облицовок каналов из бетона, полученного принудительным прессованием или укатыванием бетонных смесей на некондиционных местных заполнителях и снижением их (смесей) начального водосодержания.

**Материалы и методы. Результаты исследования.** Для качественного уплотнения таких смесей рекомендуется использовать не вибрирование, а принудительное прессование или (и) укатывание. На рисунках 1 и 2 приведены схемы уплотнения бетонных смесей на заполнителях с повышенным содержанием пылевидных и глинистых частиц при бетонировании плит (для сборной конструкции облицовки) и каналов.

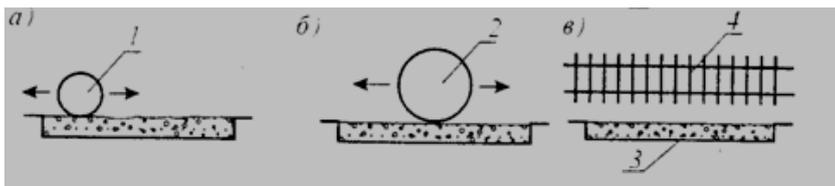


Рисунок 1 – Уплотнение бетонной смеси при формировании плит  
 а) прессование смеси; б) укатывание смеси; в) подготовка к армированию; 1 – прессирующий валец; 2 – укатывающий валец; 3 – уплотненный слой смеси; 4 – межслойная арматура

Figure 1 – Compaction of the concrete mixture during the formation of slabs  
 а) pressing of the mixture; б) rolling of the mixture; в) preparation for reinforcement; 1 – pressing roller; 2 – rolling roller; 3 – compacted layer of the mixture; 4 – interlayer reinforcement

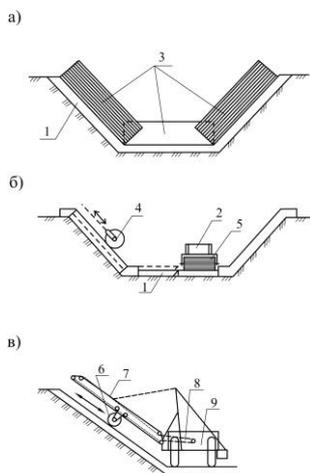


Рисунок 2 – Уплотнение бетонных смесей при бетонировании канала

а) уплотнение смеси трёхвальцовым катком; б) уплотнение смеси прицепным и двухвальцовым катком; в) уплотнение смеси навесным катком; 1 – слой бетонирования; 2 – двухвальцовый каток; 3 – трёхвальцовый каток; 4 – прицепной каток; 5 – валец катка; 6 – навесной каток; 7 – стрела; 8 – тяговые канаты; 9 – трактор

Figure 2 – Compaction of concrete mixtures during concreting of the channel  
 а) compaction of the mixture with a three-roll roller; б) compaction of the mixture with a trailer and a two-roll roller; в) compaction of the mixture with a mounted roller; 1 – a layer of concrete; 2 – a two-roll roller; 3 – a three-roll roller; 4 – a trailer roller; 5 – a roller roller; 6 – a mounted roller; 7 – an arrow; 8 – traction ropes; 9 – tractor

Приготовление бетонной смеси следует осуществлять в бетоносмесителях принудительного действия. Продолжительность перемешивания не менее 60 с. Для доставки и укладки смеси могут использоваться автосамосвалы, бетоноукладчики, краны. Укладку и распределение бетонной смеси необходимо производить послойно. При формировании плит для сборной облицовки канала подачу смеси в металлическую форму следует производить автосамосвалами, а разравнивание – мобильным отвалом или бульдозером. При бетонировании каналов бетонную смесь по дну и откосам рекомендуется распределять укладочным бункером бетоноукладчика, размеры которого соответствуют размерам поперечного сечения канала, либо распределительными шнеками или скребковыми цепями. Уплотнение смеси следует производить вальцами или катками.

Для повышения прочностных и эксплуатационных свойств бетона плит и облицованного им русла канала, помимо рекомендованной технологии уплотнения таких смесей, дополнительно, целесообразно было бы снизить и начальное их (смесей) водосодержание. Осуществить это возможно за счет использования высокоэффективных пластифицирующих добавок, однако, чтобы не удорожать стоимость работ, желательно изыскать добавку из числа крупнотоннажных промышленных отходов [14].

В качестве добавки рекомендуется пластификатор формиатно-спиртовый (ПФС), являющийся побочным продуктом производства пентаэритрита, представляющий собой водный раствор формиата натрия, сиропобразующих веществ и полиспиртов – монопентаэритрита и полипентаэритритов. ПФС более чем на порядок дешевле С-3, СМФ, ЛСТМ и других подобных им суперпластификаторов, доставляется в виде водного раствора 40–50% концентрации по массе в бочках и цистернах. Транспортирование осуществляется автомобильным и железнодорожным транспортом [10,14].

Для выявления влияния физико-химического воздействия водного раствора ПФС на прочностные и эксплуатационные свойства бетона на заполнителях с повышенным содержанием пылевидных и глинистых частиц, использовался Новороссийский портландцемент марки 500, заполнителями служили кварцевый щебень фракции 5–20 мм Потаповского месторождения с содержанием пылевидных и глинистых частиц в количестве 6,7% и отход камнедробления кварцита фракции 0–5 мм (высевка) Потаповского месторождения с модулем крупности 2,48 с содержанием 18,4% пылевидных и глинистых частиц. Для решения рецептурно-технологических задач применялись методы теории планирования эксперимента с построением геометрического образа функции отклика способами линейной алгебры [15,16]. При этом соблюдались соотношения:  $\text{Ц} + \text{Выс} = 950 \text{ кг/м}^3$ ,  $\text{Щ} = 1270 \text{ кг/м}^3$ , где: Ц, Выс, Щ – соответственно, расходы цемента, высевки, щебня.

Условия кодирования и варьирования факторов планируемого экспериментального исследования приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Кодирование и варьирование факторов

Table 1 – Coding and variation of factors

Факторы	Код $X_i$	Основной уровень, $X_0$ , %	Интервал варьирования, $\Delta X_i$	Нижний уровень, «-»	Верхний уровень, «+»
Цемент	$X_1$	400	40	360	440
ПФС	$X_2$	3,0	2,0	1,0	5,0

Графический план эксперимента представлен на рисунке 3, а матрица планирования и условия эксперимента приведены в таблице 2.

Из рисунка 3 видно, что точки принятого плана эксперимента имеют координаты вершин правильного шестиугольника, построенного в пределах варьирования факторов  $\pm 1$  в кодированной форме. Выбранный план удобен тем, что переход от кодированных значений факторов к натуральным и наоборот можно осуществить графически по соответственным осям (см. рисунок 3). По результатам семи опытов (шесть вершин и центр шестиугольника) вычисляются неизвестные коэффициенты уравнения регрессии второго порядка [15,16]:

$$\hat{y}_R = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{12}X_1X_2, \quad (1)$$

где:  $b_0 = (0y) - \sum_{i=1}^k(iiy)$ ;  $b_i = 1/3(iy)$ ;  $b_{ij} = 4/3(ijy)$ ;  
 $b_{ii} = 2/3(iiy) + 5/6 \sum_{i=1}^k(iiy) - (0y).$  (2)

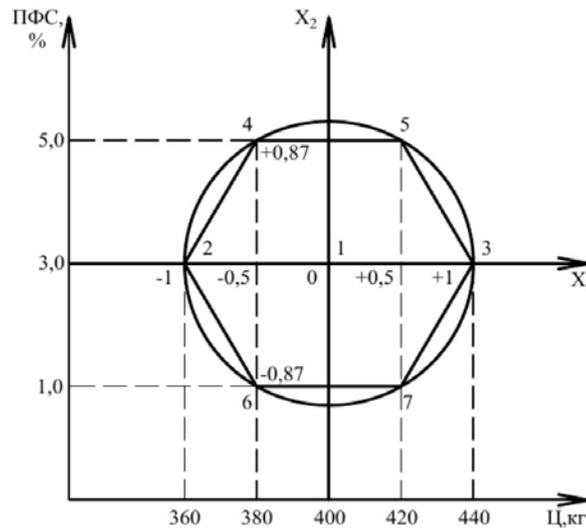


Рисунок 3 – План эксперимента на шестиугольнике

Figure 3 – Experiment plan on a hexagon

Таблица 2 – Матрица планирования и условия эксперимента

Table 2 – Planning matrix and experimental conditions

Номер опыта	План		$X_1^2$	$X_2^2$	$X_1X_2$	Факторы	
	$X_1$	$X_2$				$X_1$ (Ц)	$X_2$ (ПФС)
1	0	0	0	0	0	400	3,0
2	-1	0	1	0	0	360	3,0
3	1	0	1	0	0	440	3,0
4	-0,5	0,87	0,25	0,75	-0,43	380	5,0
5	0,5	0,87	0,25	0,75	0,43	420	5,0
6	-0,5	-0,87	0,25	0,75	0,43	380	1,0
7	0,5	-0,87	0,25	0,75	-0,43	420	1,0

По формулам (2) были подсчитаны коэффициенты уравнения регрессии второго порядка, расчётные значения которых приведены ниже:

$$\begin{aligned} b_0 &= 189,0 - (89,0 + 65,0) = 35,0; & b_1 &= 8,25/3 = 2,75; \\ b_2 &= 2,18/3 = 0,73; & b_{12} &= 4/3 \cdot (0,13) = 0,17; \\ b_{11} &= 2/3 \cdot (89,0) + 5/6 \cdot (89,0 + 65,0) - 189,0 = -1,40; \\ b_{22} &= 2/3 \cdot (65,0) + 5/6 \cdot (89,0 + 65,0) - 189,0 = -17,40. \end{aligned}$$

Для прочности бетона на сжатие после тепловлажностной обработки было получено регрессионное уравнение в нижеприведённом виде:

$$\hat{Y}_R = 35,0 + 2,75X_1 + 0,73X_2 - 1,40X_1^2 - 17,40X_2^2 + 0,17X_1X_2 \quad (3)$$

Регрессионный анализ модели (3) произведём после определения ошибки эксперимента и расчёта ошибок коэффициентов уравнения. С учётом трёхкратной повторности опытов, дисперсия воспроизводимости и ошибка проведённого эксперимента по воспроизводимости составят:

$$S_{эв}^2 = 0,27; \quad S_{эв} = \sqrt{0,27} = 0,519.$$

Таблица 3 – Расчёт ошибок коэффициентов

Table 3 – Calculation of coefficient errors

$b_m$	$b_0$	$b_i$	$b_{ii}$	$b_{ij}$
$T_i$	1,0	0,577	1,224	1,155
$T_i \cdot S_{эв}$	0,519	0,299	0,635	0,599
$t \cdot T_i \cdot S_{эв}$	0,914	0,527	1,118	1,055

где:  $T_i$  – расчётные коэффициенты для оценки ошибок коэффициентов регрессии;  
 $t$  – критерий Стьюдента,  $t = 1,761$  [15].

Таблица 4 – Регрессионный анализ модели

Table 4 – Regression analysis of the model

$b_m$	Начальная модель	$b_{кр}$	Конечная модель	$ijy$	$b_{ij}(ijy)$
$b_0$	35,0	0,914	35,0	189,0	6615,0
$b_1$	2,75	0,527	2,75	8,25	22,69
$b_2$	0,73	0,527	0,73	2,18	1,59
$b_{11}$	-1,40	1,118	-1,40	89,0	-124,60
$b_{22}$	-17,40	1,118	-17,40	65,0	-1131,0
$b_{12}$	0,17	1,055	0	0,13	0

Сумма квадратов  $SS_{мод}$ :  
 $SS_{мод} = 5383,68;$

$$SS_{эв} = S_{эв}^2 \cdot f_э = 0,27 \cdot N(n-1) = 0,27 \cdot 7(3-1) = 3,78;$$

Сумма квадратов  $S = SS_{\text{мод}} + SS_{эв} = 5387,46$

Проводим проверку адекватности модели при риске  $\alpha = 0,05$ , и числе степеней свободы  $f_{\text{на}} = 7 - 5 = 2$  и  $f_{\text{на}} = N(n-1) = 14$ .

Сумма квадратов  $SS_{\text{на}}$  :

$$SS_{\text{на}} = (yy) - (SS_{\text{мод}} + SS_{эв}) = 5388,45 - (5383,68 + 3,78) = 0,99,$$

– дисперсия неадекватности  $S_{\text{на}}^2$  :

$$S_{\text{на}}^2 = SS_{\text{на}} / f_{\text{на}} = 0,99 / (7-5) = 0,495,$$

– критерий Фишера:

$$F_a = S_{\text{на}}^2 / S_{эв}^2 = 0,495 / 0,27 = 1,83 ,$$

$$F_a = 1,83 < F_T = 3,76.$$

Таким образом, можно допустить, что математическая модель (4)

$$\hat{y}_R = 35,0 + 2,75X_1 + 0,73X_2 - 1,40X_1^2 - 17,40X_2^2 , \quad (4)$$

с риском  $\alpha = 0,05$  адекватно описывает результаты эксперимента. Анализ модели (4) произведём после определения её типа и построения соответствующего ей геометрического образа. Для этого, воспользуемся общей теорией поверхностей второго порядка [15,16], принимая:

$$b_0 - y = a_0; b_{ij} = 2a_{ij}; b_i = 2a_i; b_{ii} = 2a_{ii} \quad (5)$$

Инварианты кривой второго порядка составят:

– сумма коэффициентов при квадратичных членах:

$$S = b_{11} + b_{22} = -1,4 - 17,4 = -18,8;$$

– определитель, составленный из коэффициентов при старших членах:

$$\delta = \begin{vmatrix} b_{11} & 0,5b_{12} \\ 0,5b_{12} & b_{22} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -1,4 & 0 \\ 0 & -17,4 \end{vmatrix} = 24,36; \quad (6)$$

– определитель третьего порядка, составленный из всех коэффициентов:

$$\Delta = \begin{vmatrix} b_{11} & 0,5b_{12} & 0,5b_1 \\ 0,5b_{12} & b_{22} & 0,5b_2 \\ 0,5b_1 & 0,5b_2 & b_0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -1,4 & 0 & 1,375 \\ 0 & -17,4 & 0,365 \\ 1,375 & 0,365 & 35,0 \end{vmatrix} = 885,68 \quad (7)$$

Принимая во внимание, что  $\delta > 0$ ,  $\Delta \neq 0$ ,  $S\Delta < 0$  уравнение (4) описывает эллиптическую поверхность отклика.

Используя инварианты (5), (6) и (7), приведём уравнение (4) к удобной для анализа и геометрической интерпретации канонической форме:

$$\lambda_1 \bar{X}_1^2 + \lambda_2 \bar{X}_2^2 + C = 0. \quad (8)$$

Коэффициенты канонической формы вычисляем через инварианты:

$$C = \frac{\Delta}{\delta} = \frac{885,68}{24,36} = 36,36, \quad (9)$$

$$\lambda_{1,2} = \frac{S}{2} \pm \sqrt{\frac{S^2}{4} - \delta} = -9,4 \pm 8,0; \quad (10)$$

$$\lambda_1 = -1,40; \lambda_2 = -17,40.$$

С геометрической точки зрения переход к уравнению (8) означает перенос начала

координат в центр кривой (поверхности) и поворот их на некоторый угол до совмещения с главными осями кривой (поверхностями) второго порядка. С учётом (9) и (10) каноническая форма уравнения (4) примет вид:

$$-1,40\bar{X}_1^2 - 17,40\bar{X}_2^2 + 36,36 = R_{ТВО} \quad (11)$$

а координаты центра поверхности отклика определяются по формулам:

$$\begin{aligned} \bar{X}_{01} &= \frac{\begin{vmatrix} -0,5b_1 & 0,5b_{12} \\ -0,5b_2 & b_{22} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} b_{11} & 0,5b_{12} \\ 0,5b_{12} & b_{22} \end{vmatrix}} = \frac{\begin{vmatrix} -1,375 & 0 \\ -0,365 & -17,40 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -1,40 & 0 \\ 0 & -17,40 \end{vmatrix}} = \frac{23,93}{24,36} = 0,98, \\ \bar{X}_{02} &= \frac{\begin{vmatrix} b_{11} & -0,5b_1 \\ 0,5b_{12} & -0,5b_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} b_{11} & 0,5b_{12} \\ 0,5b_{12} & b_{22} \end{vmatrix}} = \frac{\begin{vmatrix} -1,40 & -1,375 \\ 0 & -0,365 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -1,40 & 0 \\ 0 & -17,40 \end{vmatrix}} = \frac{0,511}{24,36} = 0,021. \end{aligned} \quad (12)$$

Так как коэффициент  $b_{12}$  равен нулю, то нет поворота новых осей относительно первоначальных.

По канонической форме (11) полуоси эллипсов определяются из нижеследующих соотношений:

$$a = \sqrt{\frac{36,36 - R_{ТВО}}{1,40}}; \quad b = \sqrt{\frac{36,36 - R_{ТВО}}{17,40}}. \quad (13)$$

Задаваясь для функции отклика шагом  $\Delta\hat{y}_R = 1,0$ , получим ряд сечений, проекции которых на факторную плоскость будут эллипсами с полуосями, определяемыми по формулам (13).

$$\text{Для } R_{ТВО} = 36,3; a = \sqrt{\frac{36,36 - 36,3}{1,40}} = 0,21; b = \sqrt{\frac{36,36 - 36,3}{17,40}} = 0,06;$$

$$\text{Для } R_{ТВО} = 36,0; a = \sqrt{\frac{36,36 - 36,0}{1,40}} = 0,51; b = \sqrt{\frac{36,36 - 36,0}{17,40}} = 0,14; \text{ и т.д.}$$

Геометрический образ модели  $\hat{y}_R (R_{ТВО})$  изображен на рисунке 4.

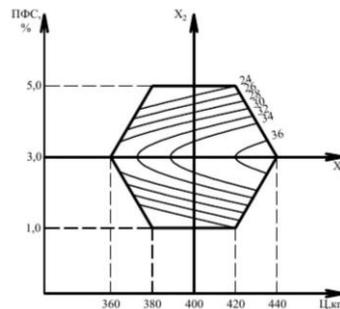


Рисунок 4 – Геометрический образ модели  $\hat{y}_R$  прочности бетона после тепловлажностной (ТВО) обработки

Figure 4 – Geometric image of the concrete strength model after heat and moisture (HME) treatment

**Результаты и обсуждение.** В пользу предложенных для плит и облицовки каналов бетонов свидетельствуют и результаты сравнительных испытаний бетонных образцов-кубов с расходами цемента  $360 \text{ кг/м}^3$  и  $430 \text{ кг/м}^3$  с такими же заполнителями, но без добавления в смесь пластификатора ПФС. Прочность образцов после ТВО, имеющих дозировку цемента в количестве  $360 \text{ кг/м}^3$ , соответствовала  $16,24 \text{ МПа}$ , а в количестве  $430 \text{ кг/м}^3$  –  $21,8 \text{ МПа}$ . При наличии в смеси пластификатора ПФС (3%), прочностные показатели бетонов с расходами цемента  $360 \text{ кг/м}^3$  и  $430 \text{ кг/м}^3$ , достигают, соответственно,  $30,85 \text{ МПа}$  и  $36,27 \text{ МПа}$ . Такой (60–80%) прирост прочности объясняется тем, что пылевидные и глинистые частицы в присутствии пластификатора ПФС играют в смеси роль микрозаполнителя, способного выполнять функции дополнительных центров кристаллизации и проявлять дефлокулирующее действие в гидратирующейся системе «цемент-вода» [13,14].

Морозостойкость бетона оценивалась способностью выдерживать в насыщенном растворе соли состоянии многократное замораживание и оттаивание без внешних признаков разрушения и существенного снижения прочности [14]. Нормируемые характеристики определялись по результатам испытаний бетонных образцов-кубов с ребром  $100 \text{ мм}$  28-суточного возраста. Насыщение и оттаивание образцов осуществлялось в ваннах с 5%-ным водным раствором хлорида натрия температурой  $20^\circ\text{C}$ , а замораживание – в морозильной камере, обеспечивающей достижение и поддержание температуры воздуха и среды замораживания минус  $50^\circ\text{C}$ . Состав бетона: Ц=430  $\text{кг/м}^3$ , Выс=520  $\text{кг/м}^3$ , Щ=1270  $\text{кг/м}^3$ , В=180  $\text{л/м}^3$ , ПФС=12,9  $\text{кг/м}^3$ .

Результаты испытаний при числе циклов попеременного замораживания и оттаивания – 37:

- среднее значение прочности  $R_{cp}$  контрольных образцов –  $43,9 \text{ МПа}$ , основных –  $44,5 \text{ МПа}$ ;

- среднеквадратичное отклонение  $\sigma_n$  для контрольных образцов –  $1,92 \text{ МПа}$ , для основных –  $1,32 \text{ МПа}$ ;

- коэффициент вариации  $V_m$  прочности для контрольных образцов –  $4,37\%$ , для основных –  $2,97\%$ ;

- нижняя граница доверительного интервала прочности при критерии Стьюдента  $2,57$  для контрольных образцов:  $43,9 - 2,57 \cdot 1,92 = 38,97 \text{ МПа}$ ; для основных:  $44,5 - 2,57 \cdot 1,32 = 41,11 \text{ МПа}$ .

Таким образом, образцы бетона с упомянутым выше составом выдержали 37 циклов испытаний, что соответствует марки бетона по морозостойкости 300.

В результате проведенных исследований появляется возможность расширения сырьевой базы для производства сборных железобетонных плит и снижения стоимости работ при устройстве бетонных облицовок каналов водохозяйственных систем за счет использования в бетоне недорогих местных некондиционных заполнителей.

**Выводы.** Для безопасной и надежной работы каналов водохозяйственных систем и предотвращения, таким образом, экологического ущерба компонентам окружающей среды за счет минимизации потерь подаваемой потребителям воды в нормальных и в экстремальных условиях эксплуатации, предложены облицовки каналов из бетона на некондиционных местных заполнителях, полученного принудительным прессованием или(и) укатыванием бетонных смесей на заполнителях с повышенным содержанием пылевидных и глинистых частиц и, снижением их (смесей) начального водосодержания, посредством добавления в смесь пластификатора формиатно-спиртового, являющимся отходом производства пентаэритрита. Установлено положительное влияние предложенных мер на прочностные и эксплуатационные свойства бетона, отвечающего установленным требованиям. Методом планирования эксперимента получена полиноми-

альная модель второго порядка, адекватно на 5%-ном уровне значимости описывающая зависимость прочности бетона на местных заполнителях с повышенным содержанием загрязняющих частиц от расхода цемента и дозировки пластификатора ПФС: при расходе цемента от 360 до 440 кг/м<sup>3</sup> дозировку пластификатора в виде водного раствора в количестве 3,0% от массы цемента следует считать оптимальной; добавление пластификатора ПФС в состав смеси повысило прочность бетона после тепловой обработки на 60–80%. Ускоренными испытаниями бетонных образцов на морозостойкость в растворе хлорида натрия подтверждено соответствие бетона на местных заполнителях с повышенным содержанием пылевидных и глинистых частиц марке 300.

Результаты проведенных исследований выявили возможность расширения сырьевой базы для формования плит и устройства облицовки каналов водохозяйственных систем за счет использования в бетоне недорогих местных заполнителей с повышенным содержанием загрязняющих частиц.

### Список литературы

1. Щедрин В.Н., Колганов А.В., Косиченко Ю.М. Эксплуатационная надежность оросительных систем. Ростов-на -Дону: Изд-во СКНЦВШ, 2004. 388 с.
2. Сенчуков Г.А. Мелиорация, рекультивация и охрана земель. Новочеркас. гос. мелиоратив. акад. Новочеркасск: НГМА, 2006. 307 с.
3. Щедрин В.Н. Проблемы и перспективы мелиорации на Нижнем Дону. Новочеркасск: ФГНУ «РосНИИПМ», 2000. 170 с.
4. Волосухин В.А., Бондаренко В.Л., Свистунов Ю.А. Безопасность гидротехнических сооружений. Краснодар: НГМА – КГАУ, 2001. 89 с.
5. Бондаренко В.Л., Ключкович З.А. Прогнозирование и методика расчёта ущерба при чрезвычайных ситуациях для объектов народного хозяйства: Учебное пособие. Ростов н/Д: Изд-во О.О.О. Тарра, 2001. 79 с.
6. Турлов А.Г. Строительство и реконструкция водохозяйственных сооружений: учебное пособие. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2014. 113 с.
7. Голованов А.И. Основы природообустройства. М.: Колос. 2001. 262 с.
8. Косиченко Ю.М. Каналы переброски стока России. Новочеркасск: НГМА, 2004. 470 с.
9. Федоров В.М. Оценка надёжности водопроводящей сети оросительных систем // Научный журнал КубГАУ. 2011. № 65(01).
10. Федоров В.М., Васильева Е.В., Яковенко Е.А. Безопасные и надежные сооружения водохозяйственных систем из укатанных бетонов. Новочеркасск: Лик. 2019. 166 с.
11. Сиротин Ю.Г. Основы строительного производства: учебное пособие. Екатеринбург: УралГАХА, 2013. 169 с.
12. Розанов Н.П. Гидротехнические сооружения. М.: Агропромиздат, 1985. 431 с.
13. Маилян Р.Л. Бетон на карбонатных заполнителях. Ростовск. гос. универ. Ростов- на-Дону: РГУ, 1967. 272 с.
14. Баженов Ю.М., Комар А.Г. Технология бетонных и железобетонных сооружений. М.: Стройиздат, 1984. 671 с.
15. Вознесенский В. А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. М.: Финансы и статистика, 1981. 262 с.
16. Юдин М.И. Планирование эксперимента и обработка результатов. Краснодар: КГАУ, 2004. 239 с.

## References

1. Shchedrin V.N., Kolganov A.V., Kosichenko Yu.M. Ehkspluatatsionnaya nadezhnost' orositel'nykh sistem. Rostov-na -Donu: Izd-vo SKNCVSH, 2004. 388 p. [In Russian]
2. Senchukov G.A. Melioratsiya, rekul'tivatsiya i okhrana zemel'. Novocherkas. gos. meliorativ. akad. Novocherkassk: NGMA, 2006. 307 p. [In Russian]
3. Shchedrin V.N. Problemy i perspektivy melioratsii na Nizhnem Donu. Novocherkassk: FGNU «RoSNIIPM», 2000. 170 p. [In Russian]
4. Volosukhin V.A., Bondarenko V.L., Svistunov Yu.A. Bezopasnost' gidrotekhnicheskikh sooruzhenij. Krasnodar: NGMA – KGAU, 2001. 89 p. [In Russian]
5. Bondarenko V.L., Klyukovich Z.A. Prognozirovanie i metodika raschyota ushcherba pri chrezvychajnykh situatsiyakh dlya ob'ektov narodnogo khozyajstva: Uchebnoe posobie. Rostov n/D: Izd-vo O.O.O. Tarra, 2001. 79 p. [In Russian]
6. Turlov A.G. Stroitel'stvo i rekonstruktsiya vodokhozyajstvennykh sooruzhenij: uchebnoe posobie. Joshkar-Ola: PGU, 2014. 113 p. [In Russian]
7. Golovanov A.I. Osnovy prirodobustrojstva. M.: Kolos. 2001. 262 p. [In Russian]
8. Kosichenko Yu.M. Kanaly perebroski stoka Rossii. Novocherkassk: NGMA, 2004. 470 p. [In Russian]
9. Fedorov V.M. Otsenka nadyozhnosti vodoprovodyashchej seti orositel'nykh sistem. Nauchnyj zhurnal KuBGU. 2011, no. 65(01), pp.00–00. [In Russian]
10. Fedorov V.M., Vasil'eva E.V., Yakovenko E.A. Bezopasnye i nadezhnye sooruzheniya vodokhozyajstvennykh sistem iz ukatannykh betonov. Novocherkassk: Lik. 2019.166 p. [In Russian]
11. Sirotin Yu.G. Osnovy stroitel'nogo proizvodstva: uchebnoe posobie. Ekaterinburg: UraLGAKHA, 2013. 169 p. [In Russian]
12. Rozanov N.P. Gidrotekhnicheskie sooruzheniya. M.: Agropromizdat, 1985. 431 p. [In Russian]
13. Mailyan R.L. Beton na karbonatnykh zapolnitelyakh. Rostovsk. gos. univer. Rostov-na-Donu: RGU, 1967. 272 p. [In Russian]
14. Bazhenov Yu.M., Komar A.G. Tekhnologiya betonnykh i zhelezobetonnykh sooruzhenij. M.: Strojizdat, 1984. 671 p. [In Russian]
15. Voznesenskij V.A. Statisticheskie metody planirovaniya ehksperimenta v tekhniko-ehkonomicheskikh issledovaniyakh. M.: Finansy i statistika, 1981. 262 p. [In Russian]
16. Yudin M.I. Planirovanie ehksperimenta i obrabotka rezul'tatov. Krasnodar: KGAU, 2004. 239 p. [In Russian]

## Информация об авторах/Information about authors

**Васильева Елена Викторовна**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Экология и промышленной безопасности» Южно-Российского государственного политехнического университета им. М.И. Платова. Новочеркасск, Российская Федерация

[karalenka5@yandex.ru](mailto:karalenka5@yandex.ru)

**Elena V. Vasilyeva**, PhD, Associate Professor of the Department of Ecology and Industrial Safety, South Russian State Polytechnic University named after M.I. Platov.

Novocherkassk, Russian Federation

[karalenka5@yandex.ru](mailto:karalenka5@yandex.ru)

**Фёдоров Виктор Матвеевич**, доктор технических наук, профессор кафедры «Техносферная безопасность и нефтегазовое дело» Новочеркасского инженерно-мелиоративного института имени А. К. Кортунова – филиала Донского государственного аграрного университета. Новочеркасск, Российская Федерация  
[viktor-fedorov1955@yandex.ru](mailto:viktor-fedorov1955@yandex.ru)

**Viktor M. Fedorov**, Doctor of Sciences (Engineering), Professor of the "Technosphere Safety and Oil and Gas Business" Department, Novochoerkassk Engineering and Reclamation Institute named after A.K. Kortunov – branch of Don State Agrarian University.  
Novochoerkassk, Russian Federation  
[viktor-fedorov1955@yandex.ru](mailto:viktor-fedorov1955@yandex.ru)