

MIESIĘCZNIK  
POŁOCKI.

Т о м I.  
Р о к 1818.

*«Вестник Полоцкого государственного университета» продолжает традиции первого в Беларуси литературно-научного журнала «Месячник Полоцкий».*

№ 8(31), 2022

---

ВЕСТНИК ПОЛОЦКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА  
Серия F. Строительство. Прикладные науки

В серии F научно-теоретического журнала публикуются статьи, прошедшие рецензирование, содержащие новые научные результаты в области геодезии, геоэкологии, экологической безопасности строительства и городского хозяйства, строительства и архитектуры.

---

ВЕСНІК ПОЛАЦКАГА ДЗЯРЖАУНАГА УНІВЕРСІТЭТА  
Серыя F. Будаўніцтва. Прыкладныя навукі

У серыі F навукова-тэарэтычнага часопіса друкуюцца артыкулы, якія прайшлі рэцэнзаваанне і змяшчаюць новыя навуковыя вынікі ў галіне геадэзіі, геаэкалогіі, экалагічнай бяспекі будаўніцтва і гарадской гаспадаркі, будаўніцтва і архітэктуры.

---

HERALD OF POLOTSK STATE UNIVERSITY  
Series F. Civil engineering. Applied sciences

The F series of the scientific and theoretical journal publishes peer-reviewed articles containing new scientific results in the field of geodesy, geoecology, environmental safety of construction and urban economy, construction and architecture.

---

Журнал входит в Российский индекс научного цитирования.

Электронная версия номера размещена на сайте: <https://journals.psu.by/constructions>

Адрес редакции:  
Полоцкий государственный университет, ул. Блохина, 29, г. Новополоцк, 211440, Беларусь  
тел. + 375 (214) 59 95 41, e-mail: [vestnik@psu.by](mailto:vestnik@psu.by)

Отв. за выпуск: *А.М. Нияковский.*  
Редактор *А.А. Прадидова.*

Подписано к печати 29.06.2022. Бумага офсетная 70 г/м<sup>2</sup>. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Ризография.  
Усл. печ. л. 14,88. Уч.-изд. л. 17,94. Тираж 100 экз. Заказ 436.

## СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 628.12

DOI 10.52928/2070-1683-2022-31-8-2-9

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА И АНАЛИЗА РЕЖИМОВ РАБОТЫ  
ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ С РЕГУЛИРУЕМЫМ ПРИВОДОМ  
В СОСТАВЕ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ВОДООТВЕДЕНИЯ*д-р техн. наук, проф. И.В. ВОЙТОВ*ORCID <https://orcid.org/0000-0001-8851-6834>*(Белорусский государственный технологический университет, Минск)**В.Л. ЕЛОВИК**(УП «Полимерконструкция», Витебск)*

*Рассмотрены разработанные на текущий момент методы расчета режимов работы и энергопотребления центробежными насосами. Проанализирована применимость существующих методик к расчету режимов работы насосного оборудования, работающего с переменной частотой вращения рабочего колеса.*

**Ключевые слова:** *энергоэффективность, частотно-регулируемый привод, водопроводно-канализационное хозяйство, насосный агрегат.*

**Введение.** Вопросам расчета и анализа режимов работы систем подачи и распределения воды (СПРВ) и систем перекачки сточных вод (СПСВ) в целом и насосного оборудования в частности посвящены труды многих исследователей: К. Пфлейдерер (С. Pfleiderer), Е.А. Прегер, Л.Ф. Мошнин, В.Г. Ильин, Н.Н. Абрамов, В.П. Старинский, Б.С. Лезнов, Г.А. Ключникова, А.П. Усачев, Р.А. Кахоров и др. В работах этих и других исследователей приводятся различные подходы, методы анализа, формы математического описания режимов работы СПРВ, СПСВ и входящего в их состав насосного оборудования как с использованием РЭП, так и без него.

Накопленный за последние 20–30 лет эксплуатации РЭП опыт показывает, что не всегда удается с требуемой точностью спрогнозировать эффективность применения РЭП на насосных станциях систем водоснабжения и водоотведения.

В первую очередь это вызвано тем, что существующие на данный момент методические подходы к расчету и анализу режимов работы насосного оборудования не в полной мере позволяют учесть в расчетах все нюансы работы частотно-регулируемых центробежных насосов, а именно: зависимость изменения КПД от частоты вращения рабочего колеса, соблюдение границ рабочей зоны насоса при изменении частоты вращения рабочего колеса, переходные режимы параллельной работы группы насосного оборудования и т.д.

Во вторую очередь – существующие методы и подходы позволяют в качестве результата получать лишь сводные, укрупненные показатели: объем перекаченной воды за расчетный период, объем затраченной на это электроэнергии за расчетный период и т.д.

В третью очередь – в существующих методах, ориентированных на ручной, не автоматизированный расчет, используется ряд допущений и поправочных коэффициентов. Это хоть и упрощает сами расчеты, сводя все, как правило, к одной-двум расчетным формулам, но значительно снижает точность результата.

Рассмотрим более подробно методические подходы к расчету режимов работы центробежных насосов, разработанные на данный момент.

**Зависимости для расчета режимов работы центробежных насосов.** К настоящему времени разработан ряд аналитических зависимостей, характеризующих основные технологические параметры систем подачи и распределения воды. Еще в 30-е годы прошлого столетия немецким исследователем К. Пфлейдерером было предложено уравнение характеристической поверхности (1), которое характеризует напор, развиваемый лопастным насосом в зависимости от требуемой подачи и частоты вращения рабочего колеса [1, с. 211]:

$$H_x = k_1 \cdot n^2 + 2k_2 \cdot n \cdot Q_x - k_3 \cdot Q_x^2, \quad (1)$$

где  $H_x$  – напор (м. вод. ст.), развиваемый насосом для обеспечения подачи  $Q_x$  (м<sup>3</sup>/ч) при частоте вращения рабочего колеса  $n$  (об/мин);

$k_1, k_2, k_3$  – постоянные для каждого отдельного насоса коэффициенты, определяемые исходя из геометрических параметров проточной части насоса [2, с. 432, формулы (10.30)–(10.32)]. Графическое отображение характеристики (1) в осях ( $Q_x, H_x, n$ ) приведено на рисунке 1.

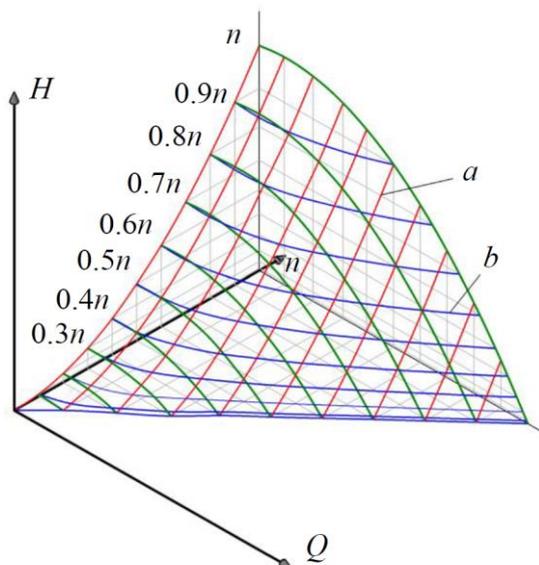
Предложенная характеристическая поверхность позволяет представить работу насоса в режимах, требующих поддержания определенного значения подачи при переменном напоре (кривые семейства *a*) или наоборот, режимы поддержания постоянного напора при переменной подаче (кривые семейства *b*).

Известным российским исследователем Е.А. Прегером предложена методика подбора насосов по уравнениям их характеристик [3]. При помощи аналитических уравнений предлагается определять напор, развиваемый насосом, и потребляемую мощность при переменной подаче:

$$H = a_0 + a_1 \cdot Q + a_2 \cdot Q^2, \quad (2)$$

$$N = b_0 + b_1 \cdot Q + b_2 \cdot Q^2, \quad (3)$$

где  $H$  – развиваемый насосом напор (м. вод. ст.) при подаче  $Q$  (м<sup>3</sup>/ч);  
 $N$  – потребляемая насосом мощность (кВт) при подаче  $Q$  (м<sup>3</sup>/ч);  
 $a_0, a_1, a_2$  и  $b_0, b_1, b_2$  – эмпирические коэффициенты, постоянные для конкретного насоса.



$a$  – кривые равных подач (красные линии);  $b$  – кривая равных напоров (синие линии);  $1n \dots 0.3n$  – напорные характеристики насоса при соответствующей частоте вращения рабочего колеса (зеленые линии)

Рисунок 1. – Характеристическая поверхность центробежного насоса

Пересчет характеристик для режимов работы с переменной частотой производится в соответствии с законом подобия:

$$\frac{Q_p}{Q_n} = \frac{n_p}{n_n}, \quad (4)$$

$$\frac{H_p}{H_n} = \left( \frac{n_p}{n_n} \right)^2, \quad (5)$$

$$\frac{N_p}{N_n} = \left( \frac{n_p}{n_n} \right)^3, \quad (6)$$

где  $Q_n, H_n, N_n$  – подача (м<sup>3</sup>/ч), напор (м. вод. ст.), потребляемая мощность насоса (кВт) при номинальной частоте вращения рабочего колеса  $n_n$  (об/мин);

$Q_p, H_p, N_p$  – подача (м<sup>3</sup>/ч), напор (м. вод. ст.), потребляемая мощность насоса (кВт) при частоте вращения рабочего колеса  $n_p$  (об/мин).

Точность соответствия аналитических характеристик (2) и (3) паспортным составляет 98–99% [4, с. 7].

Уравнения характеристик, предложенные Е.А. Прегером, использованы в полном или упрощенном виде в работах других исследователей.

Значение КПД насоса  $\eta$  в пределах рабочей зоны С.П. Седлуха [5] предложил определять по формуле:

$$\eta = c_0 + c_1 \cdot Q + c_2 \cdot Q^2, \quad (7)$$

где  $c_0, c_1, c_2$  – эмпирические коэффициенты, определяемые аппроксимацией (по методу наименьших квадратов) паспортной характеристики  $Q$ – $\eta$ .

В качестве эквивалентной характеристики системы распределения воды, как правило, всеми исследователями используется уравнение вида (8), которое с определенной степенью допущения характеризует изменение требуемых напоров в системе в зависимости от водопотребления [6].

$$H_{\text{тр}} = H_{\Gamma} + S \cdot Q_{\text{тр}}^2, \quad (8)$$

где  $H_{\Gamma}$  – статический напор, обусловленный разницей отметок источника и приемника воды (м. вод. ст.);  
 $S \cdot Q^2$  – динамический напор (м. вод. ст.), обусловленный потерями напора в трубопроводах и местных сопротивлениях водоразборной сети при расходе  $Q$  (м<sup>3</sup>/ч);  
 $S$  – коэффициент гидравлического сопротивления водоразборной сети (м · ч<sup>2</sup>/м<sup>6</sup>), принимается постоянным во всем диапазоне водопотребления.

**Расчет потребляемой энергии центробежным насосом.** Вопросом потребления энергии насосным оборудованием в процессе эксплуатации СПРВ и СПСВ занимались многие исследователи. На сегодняшний день предложено множество методов определения энергозатрат за расчетный период.

Годовая стоимость электроэнергии  $C_{\text{эл}}$ , затрачиваемая на транспортирование воды, определяется из следующего выражения, предложенного Е.А. Прегером [4, с. 43]:

$$C_{\text{эл}} = 0,955 \cdot \frac{Q_{\text{ср}} \cdot H_{\text{ср}}}{\eta_{\text{н}} \cdot \eta_{\text{дв}}} \cdot \sigma, \quad (9)$$

где  $Q_{\text{ср}}$  – среднесуточная за год подача насоса (м<sup>3</sup>/сут);  
 $H_{\text{ср}}$  – средний напор, развиваемый насосом за год (м. вод. ст.);  
 $\eta_{\text{н}}, \eta_{\text{дв}}$  – КПД насоса и электропривода в долях ед.;  
 $\sigma$  – текущий тариф на электроэнергию (руб/кВт · ч).

В.Г. Ильиным предложена подобная зависимость для определения годовых затрат электроэнергии  $C_{\text{э}}$  на транспортирование воды в сеть [7, с. 81–83]:

$$C_{\text{э}} = \frac{\sigma}{102 \cdot 3,6 \cdot \eta} \cdot \gamma \cdot H_{\text{н}} \cdot Q_{\text{н}} \cdot 86400 \cdot 365, \quad (10)$$

где  $H_{\text{н}}$  – требуемый напор в начальной точке сети (м. вод. ст.);  
 $Q_{\text{н}}$  – расход, подаваемый в начальную точку сети (м<sup>3</sup>/сек);  
 $\sigma$  – текущий тариф на электроэнергию (руб/кВт · ч);  
 $\gamma$  – коэффициент (доли ед.), учитывающий, какую часть годовых затрат энергии на трение в трубах составляют среднегодовые затраты энергии за срок окупаемости.  
86400 – количество секунд в сутках;  
365 – количество дней в году.

Л.Ф. Мошным [8] на основании формулы расчета гидравлического сопротивления Н.Н. Павловского предложена зависимость для расчета потребляемой электроэнергии на транспортирование воды по сети за расчетный период  $T$ :

$$\mathcal{E}_{\text{тр сум}} = \frac{1,4822 \cdot 24 \cdot 365}{102 \cdot 10^9} \cdot \frac{\gamma \cdot T}{\eta} \cdot A \cdot l \cdot q^3, \quad (11)$$

где 1,4822 и  $102 \cdot 10^9$  – эмпирические коэффициенты;  
24 – количество часов в сутках;  
365 – количество дней в году;  
 $T$  – расчетный срок эксплуатации (лет);  
 $A$  – величина, характеризуется диаметром трубопровода  $D$  и равняется  $1/D^{5,33}$ ;  
 $l$  – протяженность сети (м);  
 $q$  – расход воды (л/сек);  
 $\eta$  – общий КПД насосного оборудования, подающего воду в систему (доли ед.);  
 $\gamma$  – коэффициент неравномерности расхода электроэнергии за расчетный период, вызванный неравномерностью водопотребления.

Н.Н. Абрамовым приводится зависимость для определения суммарных затрат энергии на транспортирование воды по СПРВ [9, с. 50]:

$$P = \gamma \cdot S \cdot q_{\text{ср}}^3 \cdot K_{\text{о.ч.}}^3, \quad (12)$$

где  $S$  – удельное энергопотребление (кВт/м<sup>3</sup>);  
 $q_{\text{ср}}$  – средний за рассматриваемый период расход воды (м<sup>3</sup>/ч);  
 $K_{\text{о.ч.}}$  – максимальный коэффициент общей часовой неравномерности.

Зависимости, предложенные Е.А. Прегером (9), В.Г. Ильиным (10), Л.Ф. Мошным (11), Н.Н. Абрамовым (12), позволяют оценить приблизительный уровень энергозатрат на транспортирование воды в рассматриваемой СПРВ. Использование поправочных коэффициентов и коэффициентов неравномерности не позволяют учитывать в расчетах фактические особенности рассматриваемой СПРВ или СПСВ, такие как: фактические характеристики насосного оборудования, изменение КПД в зависимости от режима работы и количества параллельно работающих насосных агрегатов. И самое главное – с помощью данных зависимостей не представляется возможным рассчитать энергопотребление при использовании РЭП. Приведенные коэффициенты предусматривают режимы работы насосного оборудования при перемещении рабочей точки по характеристике насоса (регулирование дросселированием) и для режимов с переменной частотой вращения рабочего колеса не подходят. Кроме того, сам коэффициент  $\gamma$ , как показано в работе [5, с. 71], ввиду своей неоднозначности определения может значительно исказить результаты расчетов.

В рекомендациях Департамента по энергоэффективности Государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь<sup>1</sup> приводятся зависимости для определения годового расхода электроэнергии как при дросселировании, так и при частотном регулировании:

$$W_H = N_H \cdot T \cdot K_H, \quad (13)$$

$$W = N \cdot T \cdot K_H, \quad (14)$$

где  $W$  и  $W_H$  – годовой расход электроэнергии (кВтч) при частотном регулировании и при дросселировании соответственно;

$N$  и  $N_H$  – мощность на валу насоса (кВт) при частотном регулировании и при дросселировании соответственно, причем  $N_H$  определяется по паспорту насоса, а потребляемая мощность регулируемого насоса по выражению:

$$N = g \cdot \frac{H \cdot Q}{\eta}; \quad (15)$$

$T$  – количество часов работы;

$K_H$  – коэффициент использования. При этом коэффициент  $K_H$  по сути является величиной еще более неопределенной, чем коэффициент  $\gamma$ . Рекомендаций по определению коэффициента  $K_H$  в методических указаниях Департамента по энергоэффективности не приводится.

Очевидно, что расчет годового расхода электроэнергии по зависимостям (13), (14) можно использовать для весьма приближенных расчетов насосного оборудования, работающего в постоянном режиме (с постоянной частотой) на протяжении всего времени  $T$ .

**Расчет режимов и потребляемой энергии частотно-регулируемым центробежным насосом.** В работах Б.С. Лезнова [6; 11] предложен метод расчета потребляемой энергии за расчетный период как при частотном регулировании, так и при дросселировании. Выражение, определяющее затраты энергии частотно-регулируемого насоса, имеет вид [10, с. 38]:

$$W = \frac{N_6 \cdot T \cdot (1 + \lambda)}{\eta_{эд} \cdot 4} \cdot \left[ (1 + H^*) + \lambda^2 \cdot (1 - H^*) \right], \quad (16)$$

где  $N_6$  – мощность, потребляемая насосом (насосной станцией) при наибольшей подаче (кВт);

$H^*$  – относительное противодавление  $H^*_п$  при частотном регулировании или относительный фиктивный напор  $H^*_ф$  при дросселировании;

$T$  – продолжительность расчетного периода (ч);

$\lambda$  – относительная минимальная подача;

$\eta_{эд}$  – КПД электродвигателя (доли ед.).

Экономии электроэнергии за расчетный период предлагается определять, используя выражение [12, с. 46]:

$$W_{рез} = \frac{1}{\eta_{эд}} \cdot N_6 \cdot T \cdot \left[ w^*_д - (1 + \zeta - \eta_{пр}) \right] \cdot \varphi, \quad (17)$$

где  $w^*_д$  – относительные потери энергии при дросселировании насосов, определяемые графически по номограммам [11, рисунок 3.1];

$\zeta$  – коэффициент, учитывающий дополнительные потери в приводе (0,02–0,03);

$\varphi$  – понижающий коэффициент, принимаемый от количества рабочих насосных агрегатов;

$\eta_{пр}$  – КПД частотного преобразователя (доли ед.).

Данные зависимости, по словам Б.С. Лезнова, позволяют с отклонением в 10–15% от фактических значений рассчитывать энергопотребление насосной станции за расчетный период как с использованием РЭП, так и без него. Но заявленная точность обеспечивается только при соблюдении ряда допущений, описанных в [11, с. 7–10]. Далее приведены особо критические, по мнению авторов, из них: а) КПД центробежного насоса принимается постоян-

<sup>1</sup> URL: [https://energoeffect.gov.by/supervision/framework/20201118\\_tepem2](https://energoeffect.gov.by/supervision/framework/20201118_tepem2).

ным как при изменении частоты вращения рабочего колеса, так и при изменении числа параллельно работающих насосов; б) насосы должны быть подобраны таким образом, что оптимальная подача насосов ( $\text{КПД}=\text{max}$ ) соответствует максимальной подаче насоса; в) значения относительного противодавления  $H^*_{\text{п}}$  находятся в пределах 0,5–0,6. На практике обеспечить соблюдение данных условий затруднительно, т.к. диапазоны работы центробежных насосов как по спектру их применения, так и по их номенклатуре весьма широки.

Помимо вышесказанного, данная методика не учитывает:

- работу разнотипного насосного оборудования в составе насосной станции;
- последовательность включения/выключения каждого насосного агрегата;
- работу параллельно нескольких насосных агрегатов, оборудованных ЧРЭП. Таким образом, произвести

детальный анализ работы насосного оборудования не представляется возможным, также невозможно оценить и, следовательно, оптимизировать алгоритмы управления насосными агрегатами.

А.П. Гришин в своих исследованиях [12] рассматривает режимы работы насосного оборудования в системах сельскохозяйственного водоснабжения. При этом делается достаточно глубокий анализ неравномерности водопотребления и его влияния на основные характеристики параллельно работающего насосного оборудования, как регулируемого, так и нерегулируемого. Уделено большое внимание изменению КПД регулируемого насоса и статистическому обоснованию распределения водопотребления во всем диапазоне регулирования.

Приведены аналитические зависимости для расчета энергопотребления регулируемого насоса:

$$W(H(q_v)) = \tau \cdot H_{\text{ст}} \cdot \sum_{j=1}^n \frac{q_{vi}}{\eta_{\text{эни}}(q_{vi})} \cdot (f_{\delta q}(q_{vi})), \quad (18)$$

где  $\tau$  – время работы регулируемого насоса (ч);

$H_{\text{ст}}$  – требуемый напор в системе и принимаемый постоянным для данного режима (м. вод. ст.);

$q_{vi}$  – случайное значение водопотребления ( $\text{м}^3/\text{ч}$ );

$\eta_{\text{эни}}(q_{vi})$  – КПД насоса, соответствующий водопотреблению ( $q_{vi}$ ) (доли ед.);

$f_{\delta q}(q_{vi})$  – функция плотности распределения водопотребления ( $q_{vi}$ ).

Предложенная А.П. Гришиным методика рассматривает энергопотребление одиночного насоса без возможности учета параллельной работы группы насосов. Кроме того, выражение (18) позволяет учитывать только стабилизацию давления на напорном коллекторе насосной станции (оголовке артезианской скважины). В условиях водоснабжения сельскохозяйственных объектов, вполне возможно, этого и достаточно, но для расчета СПРВ и СПСВ населенных мест и промышленных предприятий не применимо [5].

Методика, предложенная А.П. Усачевым [13], основана на следующих положениях:

а) наличие исходных данных: паспортные характеристики насосных агрегатов, работающих в составе рассматриваемой насосной станции, информация по фактическим режимам работы насосной станции (водопотреблению) за расчетный период (год), действующие тарифы на электроэнергию;

б) расчет потребляемой мощности  $N_i$  (кВт) для каждого возможного режима работы каждого насосного агрегата, входящего в насосную станцию, определяется исходя из выражения:

$$N_i = \frac{Q_i \cdot H_i}{367 \cdot \eta_{\text{нас}} \cdot \eta_{\text{дв}} \cdot \eta_{\text{пч}} \cdot k}, \quad (19)$$

где  $Q_i$  – производительность насоса в рассматриваемом режиме ( $\text{м}^3/\text{ч}$ );

$H_i$  – развиваемый насосом напор в рассматриваемом режиме (м. вод. ст.);

$\eta_{\text{нас}}$  – КПД насоса в рассматриваемом режиме (доли ед.);

$\eta_{\text{дв}}$  – КПД электродвигателя (доли ед.);

$\eta_{\text{пч}}$  – КПД ПЧТ (доли ед.);

$k$  – коэффициент износа насосного агрегата. Потребляемая мощность рассчитывается для режимов работы при дроссельном регулировании  $N_{\text{дри}}$  и при частотном регулировании  $N_{\text{чри}}$ ;

в) для каждого режима вычисляется снижение потребляемой мощности  $\Delta N_i$  (кВт):

$$\Delta N_i = N_{\text{дри}} - N_{\text{чри}}; \quad (20)$$

г) вычисляется экономия электроэнергии  $\Delta E_T$  (кВт) за расчетный период (год):

$$\Delta E_T = \sum_{i=1}^n (\Delta N_i \cdot T), \quad (21)$$

где  $n$  – число рассматриваемых режимов за расчетный период  $T$  (ч).

д) на основании полученной экономии электроэнергии и действующих тарифов определяется срок окупаемости мероприятий по внедрению регулируемого привода и определяется экономическая эффективность его внедрения.

При всей видимой простоте приведенного алгоритма специалист, производящий фактические расчеты, неизбежно сталкивается с рядом вопросов, не имеющих ответа в работах А.П. Усачева:

а) какой порядок определения режимов работы насосного оборудования и их количества?

б) как (графически или аналитически) и по каким зависимостям (если аналитически) производится определение координат характеристик насосного оборудования  $Q_i$ ,  $H_i$ ,  $\eta_{нас}$ ,  $\eta_{дв}$ ,  $\eta_{пч}$  и  $k$  в рассматриваемых режимах?

Кроме того, следует также учитывать, что в предлагаемой методике А.П. Усачева принимается:  $\eta_{нас}$  – постоянным (равным номинальному) и независимым от частоты вращения рабочего колеса, а давление  $H_{тр}$  – постоянным и равным требуемому напору при максимальной расчетной подаче.

На основании изложенного данная методика трудно применима на практике как при проектировании новых объектов, так и при оценке внедрения РЭП на действующих объектах.

Г.А. Ключниковой<sup>2</sup> предложен подход к оптимизации режимов работы электроприводов насосных агрегатов НС систем теплофикации. В основе оптимизации лежит метод планирования эксперимента с решением задачи однокритериального выбора. Результатом решения оптимизационной задачи является определение режима работы насосного оборудования с минимальными затратами электроэнергии в статических условиях при постоянном расходе и напоре. При изменении требуемых расхода или напора оптимизационную задачу следует решать заново. Использование такого подхода к оптимизации режимов работы насосных станций во всем диапазоне работы СПРВ и СПСВ представляется задачей достаточно объемной и трудоемкой.

Также следует понимать, что в основе определения критериев оптимизации рассматриваемой электро-механо-гидравлической модели с использованием адаптированного уравнения Эйлера-Лагранжа 2-го порядка ориентир на системы теплоснабжения, имеющие значительные отличия от СПРВ и тем более СПСВ.

Р.А. Кахоровым<sup>3</sup> предложена методика и алгоритм вариативной оптимизации электроприводных систем насосных станций систем водоснабжения. Основной уклон при анализе режимов работы автором делается на переходных режимах (режимах изменения количества работающих насосных агрегатов). На основе результатов такого анализа и принимается решение о выборе способа регулирования работы насосной станции. При этом расчет потребляемой электроэнергии рекомендуется проводить при помощи методики [11], разработанной Б.С. Лезновым [14].

**Заключение. Основные возможности существующих методов и методик расчета энергопотребления центробежных насосов.** На основании вышеизложенного существующие на сегодняшний день методологические подходы, методы и методики расчета и анализа режимов работы центробежных насосов СПРВ и СПСВ и энергопотребления центробежных насосов за расчетный период можно объединить в несколько общих групп.

**Группа 1.** Методы и подходы, основанные на анализе работы водопроводных сетей (система распределения воды) и требуемой энергии на преодоление всех сопротивлений по длине трубопроводов, в фитингах, фасонных частях и водопроводной арматуре при транспортировании расчетного количества воды. Тип, марки, режимы работы и способы регулирования насосного оборудования в расчетах не учитываются. Позволяют сделать очень приблизительный расчет энергопотребления СПРВ и СПСВ.

**Группа 2.** Методы и подходы, позволяющие рассмотреть и проанализировать отдельные режимы работы центробежного насоса в составе насосной станции. Как правило, расчет сводится к определению потребляемой мощности в каждом из рассматриваемых режимов при том или ином способе регулирования. Потребляемая энергия за расчетный период выражается как сумма потребляемых мощностей во всех возможных режимах работы за расчетный период. Использование таких подходов сопряжено с высокой трудоемкостью даже при использовании современной вычислительной техники из-за необходимости ручной подготовки большого объема (по количеству расчетных режимов) исходной информации.

**Группа 3.** Методики, позволяющие рассчитать и проанализировать энергопотребление насосной станции СПРВ или СПСВ за расчетный период. Из-за ряда допусков и упрощений обладают невысокой точностью расчетов (погрешность 15–20%). Из-за особенностей математических подходов не позволяют учитывать в расчетах порядок изменения рабочих насосных агрегатов, использование разнотипных насосных агрегатов, комбинированные способы регулирования. По этим причинам пригодны только для общей укрупненной оценки энергоэффективности базовых решений по внедрению современных способов и алгоритмов управления центробежными насосами.

Исходя из широкого применения регулируемого привода на основе ПЧТ, высокой потенциальной энергоэффективности от его применения на центробежных насосах СПРВ и СПСВ ни одна из вышеперечисленных групп не может удовлетворить потребность в оценке и анализе режимов работы центробежных насосов с РЭП. Для обоснованного выбора способа регулирования недостаточно определить потенциальную экономию энергии от тех или иных мероприятий. Из-за того, что при частотном регулировании режимные точки насосов перемещаются не только по номинальной характеристике насоса, а по всей рабочей области СПРВ, необходимо иметь возможность:

– отслеживать соблюдение допустимых границ работы насосного оборудования, определяемых производителем;

<sup>2</sup> Ключникова, Г.А. Энергетическая оптимизация режимов работы электроприводов насосных станций : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Г.А. Ключникова. – М., 2000. – 164 л.

<sup>3</sup> Кахоров, Р.А. Исследование и оптимизация динамических процессов в электроприводных системах насосных станций : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Р.А. Кахаров. – СПб., 2019. – 136 л.

- отслеживать и анализировать изменение режимов работы насосного оборудования при изменении порядка включения/выключения насосных агрегатов при параллельной работе;
- как можно больше сократить использование ручного труда с максимальной цифровизацией процесса расчетов.

Для этого необходима разработка соответствующих методических основ технологического и энергетического моделирования режимов работы центробежных насосов, оборудованных частотно-регулируемым электроприводом, в составе систем подачи и распределения воды и систем перекачки сточных вод населенных мест, промышленных и сельскохозяйственных предприятий [15].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пфлейдерер, К. Лопаточные машины для жидкостей и газов. Водяные насосы, вентиляторы, турбовоздуходувки, турбокомпрессоры / К. Пфлейдерер ; пер. с нем. А.М. Ладогина ; под ред. В.И. Поликовского. – 4-е изд., перераб. – М. : Mashgiz, 1960. – 685 с.
2. Пфлейдерер, К. Центробежные и пропеллерные насосы : учеб. пособие для вузов / К. Пфлейдерер ; пер. с нем. В.И. Поликовского, В.К. Рерих, К.А. Ушакова. – Л. : ОНТИ-НКТП СССР, 1937. – 495 с.
3. Прегер, Е.А. Подбор лопаточных насосов по уравнениям их характеристик. Информационно-технический листок № 23 (46) / Е.А. Прегер. – Л. : Ленинградский дом научно-технической пропаганды, 1954. – 15 с.
4. Прегер, Е.А. Проектирование водопроводных и канализационных насосных станций : учеб. пособие / Е.А. Прегер, А.И. Кораблев. – Л. : ЛИСИ, 1979. – 63 с.
5. Седлуха, С.П. Методика расчета затрат энергии на подачу воды при оборудовании насосной станции регулируемые и нерегулируемые насосами / С.П. Седлуха // Вода и экология. Проблемы и решения. – 2001. – № 3 (8). – С. 71–83.
6. Лезнов, Б.С. Характеристики разветвленных трубопроводов с промежуточными отборами воды / Б.С. Лезнов // Водоснабжение и санитарная техника. – 2007. – № 12. – С. 37–39.
7. Ильин, В.Г. Расчет совместной работы насосов водопроводных сетей и резервуаров / В.Г. Ильин. – Киев : Госстройиздат УССР, 1963. – 136 с.
8. Мошнин, Л.Ф. Методы технико-экономического расчета водопроводных сетей / Л.Ф. Мошнин. – М. : Стройиздат, 1950. – 144 с.
9. Расчет водопроводных сетей : учеб. пособие для вузов / Н.Н. Абрамов [и др.]. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1983. – 278 с.
10. Лезнов, Б.С. Частотно-регулируемый электропривод насосных установок / Б.С. Лезнов. – М. : Машиностроение, 2013. – 176 с.
11. Лезнов, Б.С. Методика оценки эффективности применения регулируемого электропривода в водопроводных и канализационных насосных установках / Б.С. Лезнов. – М. : Машиностроение, 2011. – 88 с.
12. Методические рекомендации по выбору оборудования для частотно-регулируемой насосной станции второго подъема с комбинированной компоновочной схемой / А.П. Гришин [и др.]. – М. : ГНУ ВИЭСХ, 2006 – 74 с.
13. Усачев, А.П. Методика оценки эффективности частотного регулирования производительности насосных агрегатов / А.П. Усачев // Водоснабжение и санитарная техника. – 2018. – № 7. – С. 57–63.
14. Вариативная оптимизация электроприводных систем насосных агрегатов / А.А. Прокопов [и др.] // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2018. – № 6 – С. 33–42.
15. Еловик, В.Л. Методика расчета и анализа режимов работы насосных агрегатов, оборудованных регулируемым электроприводом / В.Л. Еловик // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. – 2019. – № 2. – С. 204–213.

#### REFERENCES

1. Pfleiderer, K. (1960). *Lopatochnye mashiny dlya zhidkosti i gazov. Vodyanye nasosy, ventilyatory, turbovozdukhoduvki, turbokompressory*. Moscow: Mashgiz. (In Russ.).
2. Pfleiderer, K. (1937). *Tsentrobezhnye i propellernye nasosy*. Leningrad: ONTI-NKTP SSSR. (In Russ.).
3. Preger, E.A. (1954). *Podbor lopastnykh nasosov po uravneniyam ikh kharakteristik. Informatsionno-tekhnicheskii listok № 23 (46)*. Leningrad: Leningradskii dom nauchno-tekhnicheskoi propagandy. (In Russ.).
4. Preger, E.A. & Korablev, A.I. (1979). *Proektirovanie vodoprovodnykh i kanalizatsionnykh nasosnykh stantsii*. Leningrad: LISI. (In Russ.).
5. Sedlukha, S.P. (2001). Metodika rascheta zatrat energii na podachu vody pri oborudovanii nasosnoi stantsii reguliruemyi i nereguliruemyi nasosami. *Voda i ekologiya. Problemy i resheniya [Water and Ecology]*, (3), 71–83. (In Russ.).
6. Leznov, B.S. (2007). Kharakteristiki razvetvlennykh truboprovodov s promezhutochnymi otborami vody. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika [Water Supply and Sanitary Technique]*, (12), 37–39. (In Russ.).
7. Il'in, V.G. (1963). *Raschet sovmestnoi raboty nasosov vodoprovodnykh setei i rezervuarov*. Kiev: Gosstroizdat USSR. (In Russ.).
8. Moshnin, L.F. (1950). *Metody tekhniko-ekonomicheskogo rascheta vodoprovodnykh setei*. Moscow: Stroizdat. (In Russ.).
9. Abramov, N.N., Pospelova, M.M., Somov, M.A., Varapaev, V.N. & Kerimova, D.Kh. (1983). *Raschet vodoprovodnykh setei*. Moscow: Stroizdat. (In Russ.).
10. Leznov, B.S. (2013). *Chastotno-reguliruemyy elektroprivod nasosnykh ustanovok*. Moscow: Mashinostroenie. (In Russ.).
11. Leznov, B.S. (2011). *Metodika otsenki effektivnosti primeneniya reguliruемого elektroprivoda v vodoprovodnykh i kanalizatsionnykh nasosnykh ustanovkakh*. Moscow: Mashinostroenie. (In Russ.).
12. Grishin, A.P., Avramenko, M.V., Grishin, V.A., Bolkhovitinov, Yu.B. & Grishin, A.A. (2006). *Metodicheskie rekomendatsii po vyboru oborudovaniya dlya chastotno-reguliruемой nasosnoi stantsii vtorogo pod"ema s kombinirovannoi komponovochnoi skhemoi*. Moscow: GNU VIESKh. (In Russ.).
13. Usachev, A.P. (2018). Metodika otsenki effektivnosti chastotnogo regulirovaniya proizvoditel'nosti nasosnykh agregatov [Method of estimating the efficiency of pumping unit frequency regulation]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika [Water Supply and Sanitary Technique]*, (7), 57–63. (In Russ., abstr. in Engl.).

14. Prokopov, A.A., Kakhorov, R.A., Novikov, V.A. & Belyaev, T.E. (2018). Variativnaya optimizatsiya elektroprivodnykh sistem nasosnykh agregatov [Variative optimization of electric drive systems pumping units]. *Izvestiya SPbGETU «LETI» [Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University]*, (6), 33–42. (In Russ., abstr. in Engl.).
15. Elovik, V.L. (2019). Metodika rascheta i analiza rezhimov raboty nasosnykh agregatov, oborudovannykh reguliruemym elektroprivodom [Calculation and analyses methodology of the working conditions of pumping units, equipped with adjustable drive]. *Trudy BGTU. Ser. 2, Khimicheskie tekhnologii, biotekhnologii, geokologiya [Proceedings of BSTU. Ser. 2, Chemical technologies, biotechnologies, geoecology]*, (2), 204–213. (In Russ., abstr. in Engl.).

Поступила 12.05.2022

## MODERN METHODS FOR CALCULATION AND ANALYSIS OF THE OPERATING MODES OF CENTRIFUGAL PUMPS WITH VARIABLE DRIVE AS A PART OF WATER SUPPLY AND WATER DRAINAGE SYSTEMS

**I. VOITOV, V. YALOVIK**

*The methods developed by the current time for calculating the operating modes and energy consumption of centrifugal pumps are considered. The applicability of existing methods to the calculation of operating modes of pumping equipment operating with a variable speed of the impeller is analyzed.*

**Keywords:** *energy efficiency, frequency-controlled drive, water supply and sewerage, pumping unit.*

УДК 628.12

DOI 10.52928/2070-1683-2022-31-8-10-26

## РАСЧЕТ И АНАЛИЗ РЕЖИМОВ РАБОТЫ И ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ С ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ В СИСТЕМАХ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

*д-р техн. наук, проф. И.В. ВОЙТОВ*ORCID <https://orcid.org/0000-0001-8851-6834>

(Белорусский государственный технологический университет, Минск)

В.Л. ЕЛОВИК

(УП «Полимерконструкция», Витебск)

В статье рассмотрены примеры расчета режимов работы центробежного насоса системы подачи и распределения воды с помощью вновь разработанной авторами методики. Приведены основные моменты расчета и анализа технологических, энергетических и экологических параметров, характеризующих работу центробежных насосов систем подачи и распределения воды.

**Ключевые слова:** энергоэффективность, системы подачи и распределения воды, насосный агрегат, частотно-регулируемый привод, дросселирование, условное топливо, парниковые газы, углеродная нейтральность.

**Введение.** Обоснованное внедрение частотно-регулируемого электропривода (ЧРЭП) на насосных станциях систем подачи и распределения воды (СПРВ) и систем перекачки сточных вод (СПСВ) позволяет значительно снизить энергозатраты на транспортирование воды потребителю. Это подтверждается более чем тридцатилетним опытом широкой эксплуатации ЧРЭП в системах водопроводно-канализационного хозяйства (ВКХ)<sup>1</sup> [1; 2; 6; 9; 11]. Однако проблема разработки теоретического обоснования подбора центробежных насосов с ЧРЭП пока еще до конца не решена и продолжает оставаться актуальной [3]. Ранее авторами были разработаны методические основы, позволяющие выполнять оценку энергетической эффективности и меняющегося воздействия на окружающую среду при внедрении ЧРЭП на насосных станциях систем водоснабжения и канализации<sup>2</sup> [3; 4]. В данной статье рассмотрены примеры расчета режимов работы центробежных насосов с ЧРЭП с использованием этих методических основ и выполнено их сравнение с методикой, предложенной Б.С. Лезновым [6; 7].

**Исходные данные.** В качестве исходных данных для подбора насосного оборудования, расчета и анализа режимов его работы и эффекта энергосбережения приняты следующие положения и допущения:

- рассматривается СПРВ населенного пункта с расчетным числом жителей (РЧЖ) – 35 тыс. чел.;
- среднесуточное водопотребление составляет  $Q_{\text{ср.сут}} = 7780,1 \text{ м}^3/\text{сут}$ ;
- максимальное часовое водопотребление –  $Q_{\text{max}} = 746,6 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;
- среднечасовое водопотребление –  $Q_{\text{ср}} = 324,2 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;
- минимальное часовое водопотребление –  $Q_{\text{min}} = 96,3 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;
- требуемый напор у насосной станции, необходимый для обеспечения максимального водопотребления, –  $H_{\text{max}} = 0,34 \text{ МПа}$ ;

– разница отметок требуемого пьезометра в диктующей точке и уровня воды в резервуаре чистой воды (РЧВ) –  $H_{\Gamma} = 15 \text{ м}$ ;

– коэффициенты суточной неравномерности<sup>3</sup> –  $K_{\text{min}} = 0,9$  и  $K_{\text{max}} = 1,2$ ;

– коэффициенты, учитывающие степень благоустройства жилой застройки населенного пункта, режим работы его предприятий и другие местные условия<sup>4</sup> –  $\alpha_{\text{min}} = 0,6$  и  $\alpha_{\text{max}} = 1,4$ ,  $\beta_{\text{min}} = 0,55$  и  $\beta_{\text{max}} = 1,175$ ;

– требуемое давление поддерживается в диктующей точке системы распределения воды;

– расчетный период  $T$  – 1 год, или 8760 ч.

**Определение аналитических характеристик СПРВ и расчетных режимов водопотребления.** Аналитическая характеристика системы распределения воды (водопроводной сети) определяется уравнением эквивалентной характеристики [7, с. 23]. При этом коэффициент удельного гидравлического сопротивления водоразборной сети  $S$  принимается постоянным во всем диапазоне величин водопотребления и определяется из выражения (1):

$$S = \frac{H_{\text{max}} - H_{\Gamma}}{Q_{\text{max}}^2} = \frac{34 - 15}{746,6^2} = 0,00003588 \text{ м} \cdot \text{ч}^2 / \text{м}^6 ; \quad (1)$$

$$H_{\text{тр}} = H_{\Gamma} + S \cdot Q_{\text{тр}}^2 = 15 + 0,00003588 \cdot Q_{\text{тр}}^2.$$

<sup>1</sup> Кахоров, Р.А. Исследование и оптимизация динамических процессов в электроприводных системах насосных станций : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Р.А. Кахоров. – СПб., 2019. – 136 л.

<sup>2</sup> Еловик, В.Л. Методика определения эффективности применения регулируемых приводов насосных агрегатов / В.Л. Еловик // Наука – образованию, производству, экономике : материалы Третьей междунар. науч.-техн. конф. : в 2 т. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: Б.М. Хрусталева, Ф.А. Романюк, А.С. Калиниченко. – Минск, 2006. – Т. 1. – С. 105–107.

<sup>3</sup> Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. Строительные нормы проектирования : ТКП 45-4.01-320-2018 (33020). – Введ. 01.10.18. – Минск : Минстройархитектуры, 2018. – 76 с.

<sup>4</sup> См. сноску 3.

Для подбора насосного оборудования необходимо определить значение величины водопотребления с наибольшей вероятностью возникновения  $Q_{pm}$ . Для этого воспользуемся методом трехпараметрического гамма-распределения для построения статистических кривых распределения и обеспеченности водопотребления [8]. Коэффициенты изменчивости  $C_v$  и асимметрии  $C_s$  значений водопотребления принимаются равными, определяемыми следующим образом:

$$C_v = C_s = 0,45 + 0,15 \cdot \frac{K_{\max}}{K_{\min}} + 0,55 \cdot \left( \frac{\alpha_{\max}}{\alpha_{\min}} - 1 \right) - 0,075 \cdot \sqrt{\log \text{РЧЖ}} \cdot \ln \text{РЧЖ} =$$

$$= 0,45 + 0,15 \cdot \frac{1,2}{0,9} + 0,55 \cdot \left( \frac{1,4}{0,6} - 1 \right) - 0,075 \cdot \sqrt{\log 35} \cdot \ln 35 = 0,43. \quad (2)$$

С использованием данных [8, с. 197, приложение 1] строятся кривые вероятности возникновения водопотребления и его распределения для значений  $C_v = C_s = 0,43$ , ограниченные по краям слева и справа значениями соответственно минимального,  $Q_{\min}$ , и максимального,  $Q_{\max}$ , расчетного водопотребления.

Кривая обеспеченности аппроксимируется полиномом 5-й степени с величиной достоверности  $R^2 = 1$ :

$$p_i = a + b \cdot Q_{\text{тр}} + c \cdot Q_{\text{тр}}^2 + d \cdot Q_{\text{тр}}^3 + e \cdot Q_{\text{тр}}^4 + f \cdot Q_{\text{тр}}^5. \quad (3)$$

Коэффициенты аппроксимации, входящие в уравнение (3), получены эмпирическим путем и приведены в таблице 1. Результаты расчета кривых обеспеченности и вероятности водопотребления приведены в таблице 2.

Значение водопотребления с наибольшей вероятностью возникновения  $Q_{pm}$  имеет значение 274,5 м<sup>3</sup>/ч при  $Q_{\text{ср}} = 324,2$  м<sup>3</sup>/ч.

Далее, руководствуясь общими рекомендациями по подбору центробежных насосов [5, п. 1.13], производим подбор насосного оборудования (рисунок 1).

Таблица 1. – Эмпирические коэффициенты аппроксимации кривой обеспеченности водопотребления

<i>a</i>	84,5
<i>b</i>	0,341521232
<i>c</i>	-0,002670826
<i>d</i>	4,82667E-06
<i>e</i>	-3,11939E-09
<i>f</i>	4,73855E-13

Таблица 2. – Результаты расчетов обеспеченности и вероятности водопотребления

Водопотребление $Q_{\text{тр}}$ , м <sup>3</sup> /ч	Обеспеченность $p$ , %	Вероятность $\Delta p$ , %
96,3	96,7	2,0
113,5	95,5	3,0
148,7	90,9	5,2
198,3	80,7	8,2
218,8	75,7	9,5
238,1	70,6	10,2
274,5	60,7	10,7
309,8	51,1	10,4
347,1	41,2	9,6
388,3	31,3	8,0
410,4	26,5	7,1
437,0	21,2	6,1
506,7	10,6	4,0
563,7	5,3	2,4
604,0	3,2	1,6
676,0	1,5	0,5
718,3	0,9	0,2
746,6	0,4	0,2

Для заданных условий принимаем следующий комплект рабочих насосов: один регулируемый насосный агрегат – Д125-400В с ЧРЭП установленной мощностью 55 кВт и два нерегулируемых насосных агрегата – Д125-400В-а с электроприводом установленной мощностью 45 кВт.

Для принятой группы насосов был проведен расчет на соответствие критерию энергоэффективной работы:

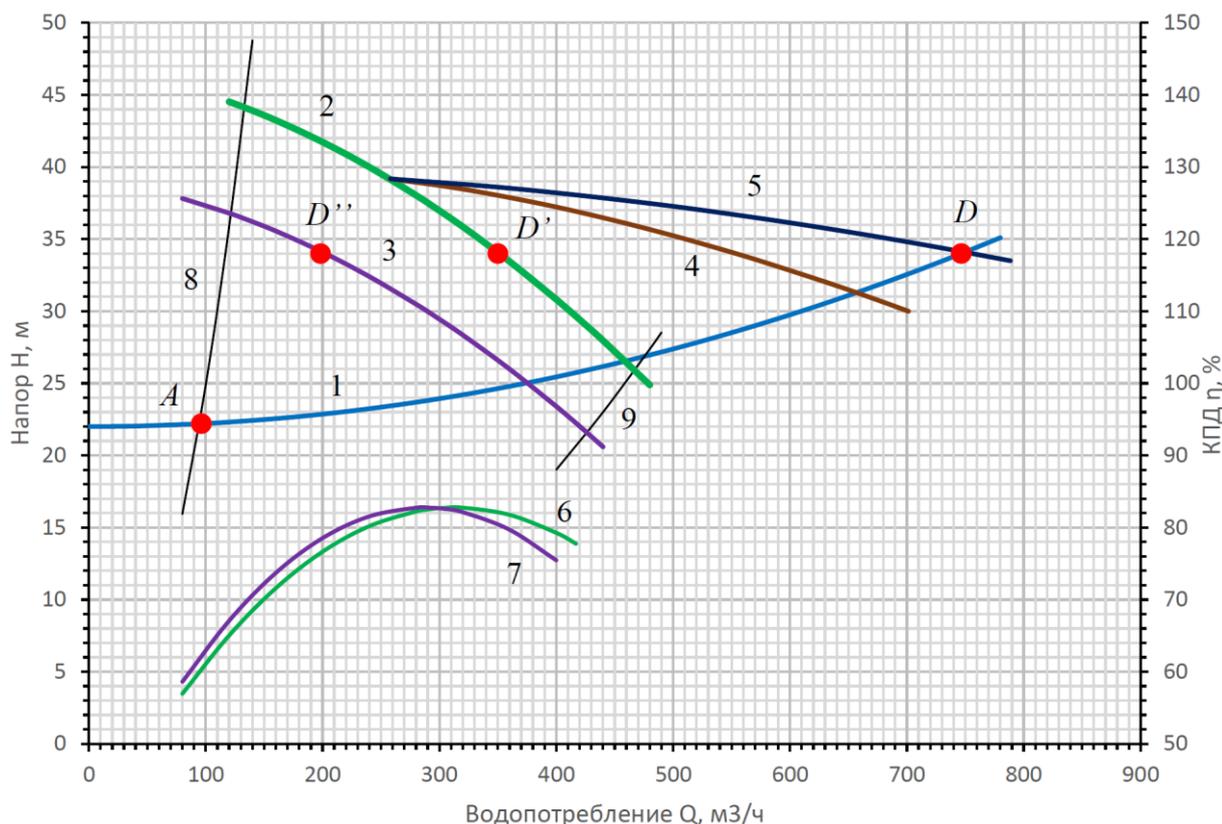
$$Q_{\text{опт}} = Q_{\text{опт}}^{\text{НОМ}} \cdot \frac{n_{\text{НОМ}}}{n_{\text{pm}}} = 320 \cdot \frac{1485}{1188} = 256 \text{ м}^3/\text{ч},$$

где  $Q_{\text{ОПТ}}^{\text{НОМ}}$  – производительность в м<sup>3</sup>/ч регулируемого насоса при максимальном КПД и номинальной скорости вращения рабочего колеса;

$n_{\text{НОМ}}$  – номинальная скорость вращения рабочего колеса в об/мин;

$n_{\text{рп}}$  – скорость вращения рабочего колеса в об/мин при обеспечении  $Q_{\text{рп}}$ .

Из таблицы 2 видно, что значение оптимальной производительности регулируемого насоса при поддержании требуемого напора в системе распределения воды (256 м<sup>3</sup>/ч), полученное путем интерполяции табличных значений, находится в зоне максимальных вероятностей возникновения (расчетная вероятность возникновения – 10,4% при максимальной 10,7%).



1 – характеристика  $Q-H$  системы распределения воды; 2 – характеристика  $Q-H$  регулируемого насоса Д125-400В с ЧРЭП; 3 – характеристика  $Q-H$  нерегулируемого насоса Д125-400В-а; 4 – суммарная характеристика  $Q-H$  параллельной работы регулируемого (при номинальной частоте вращения рабочего колеса) и нерегулируемого насосов; 5 – суммарная характеристика  $Q-H$  параллельной работы регулируемого (при номинальной частоте вращения рабочего колеса) и двух нерегулируемых насосов; 6 – характеристика  $Q-\eta$  (КПД) регулируемого насоса Д125-400В с ЧРЭП; 7 – характеристика  $Q-\eta$  (КПД) нерегулируемого насоса Д125-400В-а; 8 – левая граница рабочей зоны насосов; 9 – правая граница рабочей зоны насосов; A – минимальное расчетное водопотребление  $Q_{\text{min}}$ ; D – максимальное расчетное водопотребление  $Q_{\text{max}}$ ; D' – режимная точка подбора регулируемого насоса Д125-400В с ЧРЭП; D'' – то же нерегулируемого насоса Д125-400В-а.

Рисунок 1. – Результаты подбора центробежных насосов

Степень разнотипности  $\tau$  определяем отношением:

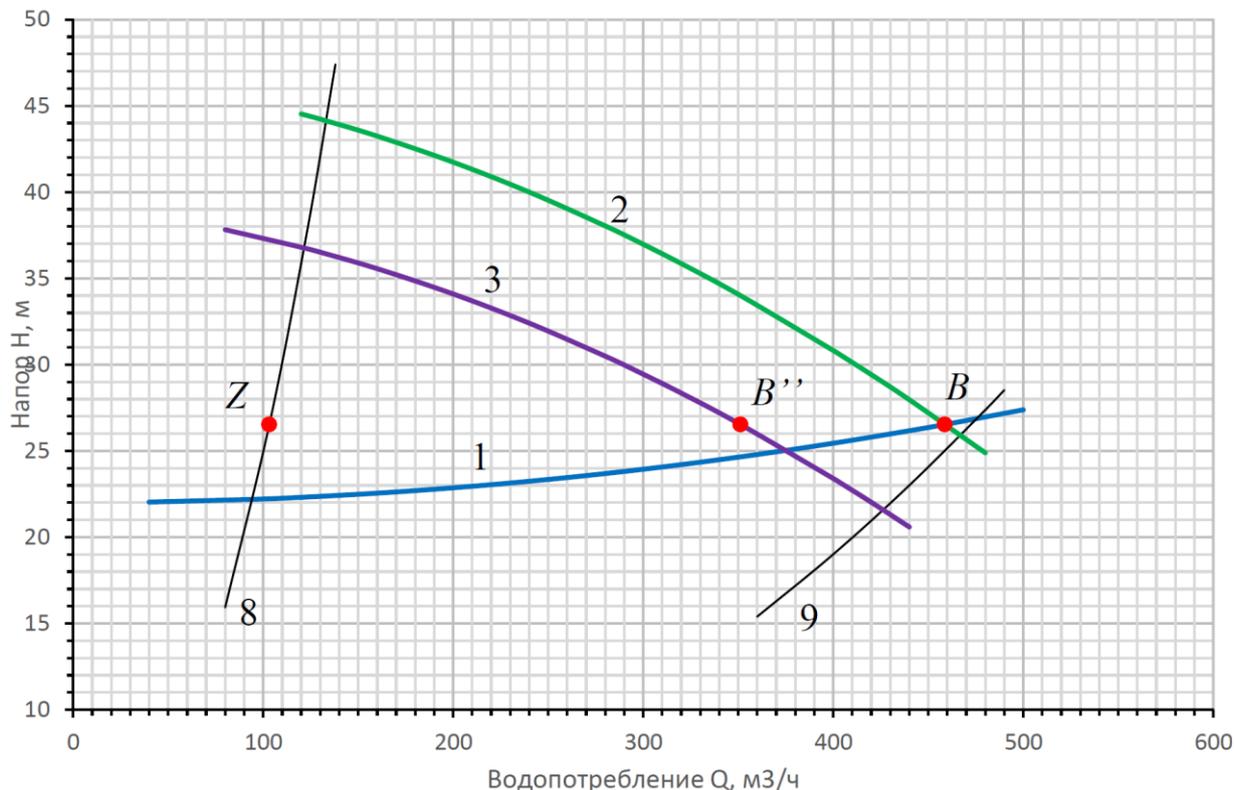
$$\tau = \frac{Q_B - Q_{B''}}{Q_Z} = \frac{458,7 - 351,1}{103,5} = 1,04 > 1,$$

где  $Q_B$  – номинальная подача регулируемого насоса в систему распределения воды (рисунок 2);

$Q_{B''}$  – подача нерегулируемого насоса при напоре  $H_B$ ;

$Q_Z$  – подача насоса на границе рабочей области при напоре  $H_B$ .

Как следует из выполненного расчета и построений на рисунке 2, условие требуемой степени разнотипности выполняется, работа регулируемого насоса во всем диапазоне регулирования обеспечивается в пределах рабочей зоны, определенной заводом-изготовителем.



1 – характеристика  $Q-H$  системы распределения воды; 2 – характеристика  $Q-H$  регулируемого насоса Д125-400В с ЧРЭП; 3 – характеристика  $Q-H$  нерегулируемого насоса Д125-400В-а; 8 – левая граница рабочей зоны насосов; 9 – правая граница рабочей зоны насосов; Z – режимная точка на левой границе рабочей зоны при напоре  $H_B$ ; B – рабочая точка работы одного регулируемого насоса Д125-400В при номинальной частоте вращения рабочего колеса; B' – рабочая точка работы нерегулируемого насоса Д125-400В-а при напоре  $H_B$

Рисунок 2. – Определение степени разнотипности подобранных насосов

Аналитические характеристики  $Q-H$  и  $Q-\eta$  насосов определяются путем аппроксимации соответствующих графических паспортных характеристик рассматриваемого насоса. Съем точек с графической диаграммы можно производить вручную или при помощи программы «GetData Graph Digitizer». Аппроксимацию рекомендуется производить по методу наименьших квадратов полиномом третьей степени [3]. Найденные коэффициенты аппроксимации приведены в таблице 3.

Таблица 3. – Коэффициенты аппроксимации характеристик  $Q-H$  и  $Q-\eta$  центробежных насосов

Д125-400В				Д125-400В-а			
$a_0$	47,0429805	$b_0$	36,25	$a_0$	39,1857482	$b_0$	36,25
$a_1$	-0,01255362	$b_1$	0,29640845	$a_1$	-0,01145739	$b_1$	0,32476852
$a_2$	-0,00007	$b_2$	-0,0004722	$a_2$	-0,00007	$b_2$	-0,0005669

**Расчет переходных режимов работы насосного оборудования.** Под переходными режимами в данном контексте подразумеваются режимы смены количества работающих насосов. Для их определения необходимо найти общие решения (точки пересечения) для пары характеристик:

– для одного насоса:

$$\begin{cases} H_B = H_{\Gamma} + S \cdot Q_B^2 \\ H_B = a_0 + a_1 \cdot Q_B + a_2 \cdot Q_B^2 \end{cases}; \tag{4}$$

– для  $m$  однотипных насосов, работающих параллельно:

$$\begin{cases} H_X = H_{\Gamma} + S \cdot Q_X^2 \\ H_X = a_0 + a_1 \cdot \frac{1}{m} \cdot Q_X + a_2 \cdot \frac{1}{m^2} \cdot Q_X^2 \end{cases}, \tag{5}$$

где  $j = m$  – номер переходной точки, соответствующий количеству работающих насосов;

– для двух разнотипных насосов 1 и 2, работающих параллельно:

$$\begin{cases} H_C = H_T + S \cdot Q_C^2 \\ Q_C = Q_1(H_C) + Q_2(H_C) \end{cases}, \quad (6)$$

где

$$Q_j(H_C) = -\frac{\sqrt{a_{1j}^2 - 4 \cdot a_{2j} \cdot (a_{0j} - H_C)} + a_{1j}}{2 \cdot a_{2j}}, \quad (7)$$

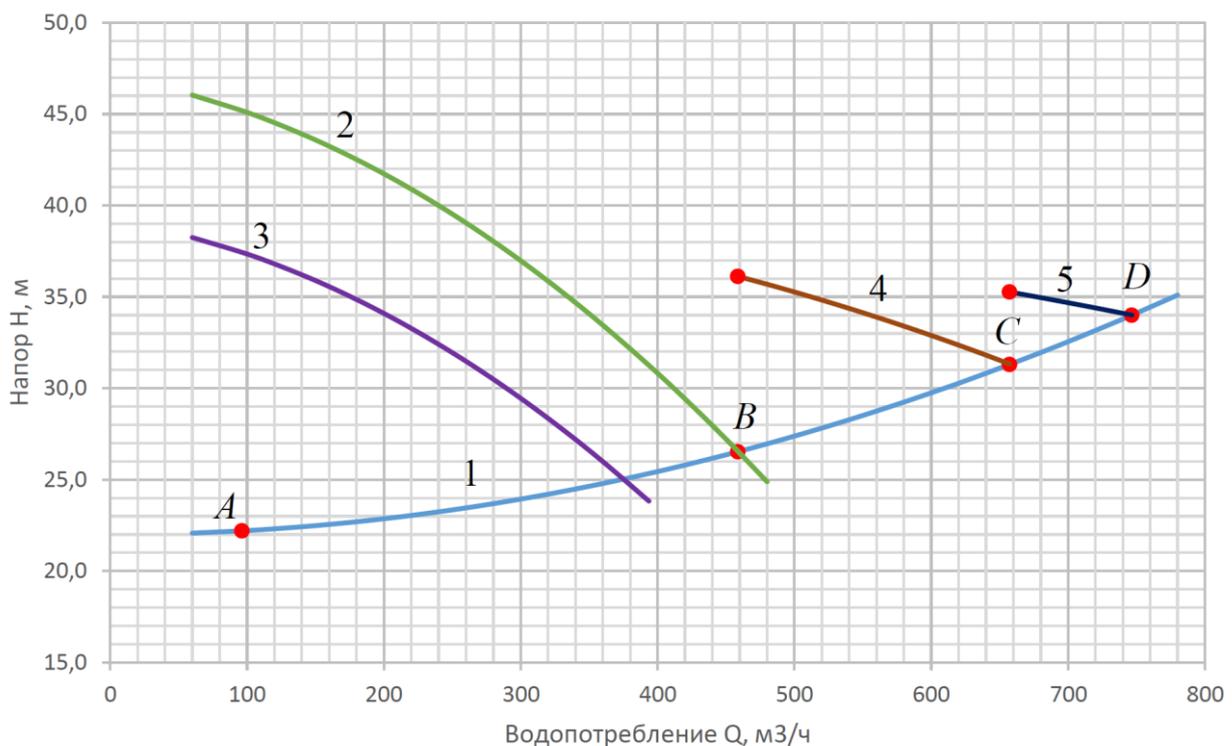
$a_j$  – порядковый номер насоса.

Переходные режимы делят диапазон водопотребления  $Q_{\min}$ – $Q_{\max}$  на расчетные участки (таблица 4 и рисунок 3), в пределах которых работает свой набор насосов. Подразумевается, что первый участок обеспечивает регулируемый насос, далее на втором к нему подключается второй нерегулируемый, на третьем – еще один и так далее до достижения  $Q_{\max}$ .

На участке  $A$ – $B$  водопотребление обеспечивает один регулируемый насос путем изменения частоты вращения рабочего колеса, на участке  $B$ – $C$  водопотребление поддерживается за счет работы регулируемого насоса параллельно с нерегулируемым, на участке  $C$ – $D$  водопотребление поддерживается за счет работы регулируемого насоса параллельно с двумя нерегулируемыми.

Таблица 4. – Результаты расчета переходных режимов

Расчетный режим	Точка на графике	$Q$ , м <sup>3</sup> /ч	$H$ , м
$Q_{\min}$	$A$	93,6	22,2
$Q_B$	$B$	458,7	26,5
$Q_C$	$C$	657,3	31,3
$Q_{\max}$	$D$	746,6	34,0



1 – характеристика  $Q$ - $H$  системы распределения воды; 2 – характеристика  $Q$ - $H$  регулируемого насоса Д125-400В с ЧРЭП; 3 – характеристика  $Q$ - $H$  нерегулируемого насоса Д125-400В-а; 4 – суммарная характеристика  $Q$ - $H$  параллельной работы регулируемого (при номинальной частоте вращения рабочего колеса) и нерегулируемого насосов; 5 – суммарная характеристика  $Q$ - $H$  параллельной работы регулируемого (при номинальной частоте вращения рабочего колеса) и двух нерегулируемых насосов;  $A$  – минимальное расчетное водопотребление  $Q_{\min}$ ;  $B$  – рабочая точка работы одного регулируемого насоса Д125-400В при номинальной частоте вращения рабочего колеса;  $C$  – рабочая точка работы регулируемого насоса Д125-400В при номинальной частоте вращения рабочего колеса параллельно с одним нерегулируемым насосом Д125-400В-а;  $D$  – максимальное расчетное водопотребление  $Q_{\max}$

Рисунок 3. – Расчетные режимы работы насосного оборудования

**Расчет режимных характеристик насосного оборудования.** Для определения производительности, КПД и потребляемой мощности каждого насоса в отдельности при их параллельной работе в группе необходимо рассчитать их режимные характеристики (рисунок 4). Последовательность действий следующая:

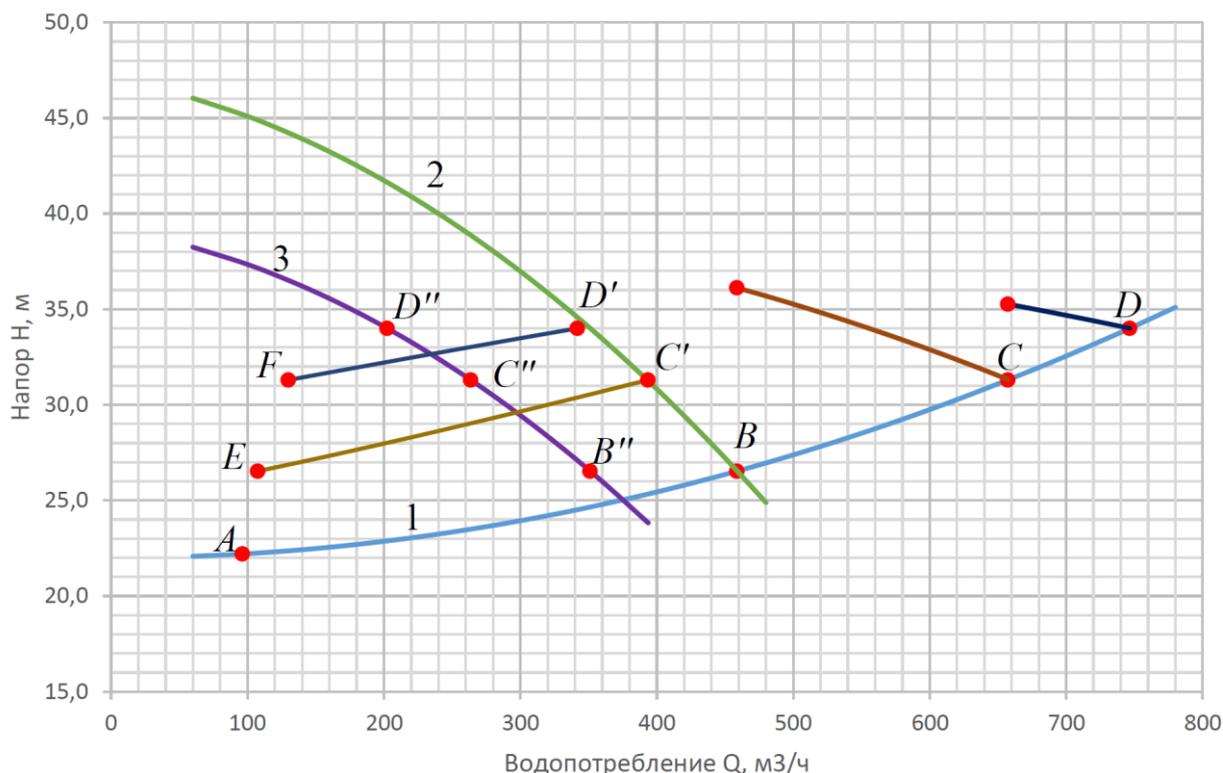
а) при работе одного регулируемого насоса в диапазоне от  $Q_{\min}$  до  $Q_B$  его режимная характеристика совпадает с характеристикой сети (1) и определяется выражением (1) на участке  $A-B$ ;

б) при параллельной работе регулируемого насоса с нерегулируемым в диапазоне водопотребления от  $Q_B$  до  $Q_C$  каждый из насосов имеет свою режимную характеристику. Зная значение водопотребления  $Q_i$ , требуемое для его обеспечения, напор  $H_i$  (1) находим режимную характеристику нерегулируемого насоса; режимная характеристика регулируемого при этом находится из выражения (8):

$$Q_p = Q_i - Q_H ; \tag{8}$$

в) при параллельной работе регулируемого насоса с двумя нерегулируемыми в диапазоне водопотребления от  $Q_C$  до  $Q_D$  режимная характеристика одного нерегулируемого насоса определяется уравнением:

$$Q_p = Q_i - 2 \cdot Q_H . \tag{9}$$



1 – характеристика  $Q-H$  системы распределения воды; 2 – характеристика  $Q-H$  регулируемого насоса Д125-400В с ЧРЭП; 3 – характеристика  $Q-H$  нерегулируемого насоса Д125-400В-а;  $A$  – минимальное расчетное водопотребление  $Q_{\min}$ ;  $B$  – рабочая точка работы одного регулируемого насоса Д125-400В при номинальной частоте вращения рабочего колеса;  $C$  – рабочая точка работы регулируемого насоса Д125-400В при номинальной частоте вращения рабочего колеса параллельно с одним нерегулируемым насосом Д125-400В-а;  $D$  – максимальное расчетное водопотребление  $Q_{\max}$ ;  $A-B$  – режимная характеристика одиночного регулируемого насоса;  $E-C'$  – режимная характеристика регулируемого насоса при параллельной работе с нерегулируемым на участке водопотребления  $B-C$ ;  $F-D'$  – режимная характеристика регулируемого насоса при параллельной работе с двумя нерегулируемыми насосами на участке водопотребления  $C-D$ ;  $C''-B''$  – режимная характеристика нерегулируемого насоса при параллельной работе с регулируемым насосом на участке водопотребления  $B-C$ ;  $D''-C''$  – режимная характеристика каждого из двух нерегулируемых насосов при параллельной работе с регулируемым на участке водопотребления  $C-D$

Рисунок 4. – Режимные характеристики насосного оборудования

Результаты расчетов приведены в таблице 5.

Таблица 5. – Результаты расчета режимов работы насосной станции во всем диапазоне водопотребления

Режим	$H_{гр}$	$Q_{гр}$	$Q_{пер}$	$Q_{пер1}$	$Q_{пер2}$
1	2	3	4	5	6
	м	м³/ч	м³/ч	м³/ч	м³/ч
A	22,20	96,3	96,3		
	22,74	185,5	185,5		

Окончание таблицы 5

1	2	3	4	5	6
	23,28	244,1	244,1		
	23,82	291,0	291,0		
	24,36	331,4	331,4		
	24,91	367,4	367,4		
	25,45	400,2	400,2		
	25,99	430,4	430,4		
B	26,53	458,7	458,7		
	26,53	458,7	107,6	351,2	
	27,13	488,0	146,8	341,2	
	27,72	515,6	184,5	331,0	
	28,32	541,8	221,2	320,6	
	28,92	566,8	256,9	309,9	
	29,51	590,7	291,9	298,8	
	30,11	613,7	326,2	287,5	
	30,70	635,8	360,1	275,7	
C	31,30	657,3	393,63	263,6	
	31,30	657,3	130,0	263,6	263,6
	31,64	669,1	155,9	256,6	256,6
	31,98	680,7	181,9	249,4	249,4
	32,31	692,1	208,1	242,0	242,0
	32,65	703,4	234,4	234,5	234,5
	32,99	714,4	260,9	226,8	226,8
	33,33	725,3	287,6	218,9	218,9
	33,66	736,0	314,5	210,7	210,7
D	34,00	746,6	341,8	202,4	202,4

**Расчет потребляемой мощности.** Расчет потребляемой мощности ведется по режимным характеристикам насосов для регулируемого и нерегулируемого насоса.

Таким образом, для первого диапазона водопотребления *A–B* потребляемая мощность в произвольном режиме всей насосной станции будет определяться выражением:

$$N_i = N_p. \quad (10)$$

Для второго диапазона водопотребления *B–C*, когда параллельно работают регулируемый насос и нерегулируемый насос:

$$N_i = N_p + N_n. \quad (11)$$

Для следующего диапазона *C–D*:

$$N_i = N_p + 2 \cdot N_n. \quad (12)$$

В результате становится известна потребляемая насосной станцией мощность во всем диапазоне водопотребления от  $Q_{\min}$  до  $Q_{\max}$ . Результаты расчетов приведены в таблице 6.

Таблица 6. – Результаты расчета потребляемой мощности

Режим	$H_{гр}$	$Q_{гр}$	$n_{рег}$	$\eta_{рег}$	$\eta_{нрег}$	$N_{рег}$	$N_{нрег}$	$N_{нерег}$	$\sum N$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	м	м <sup>3</sup> /ч	д.ед	%	%	кВт	кВт	кВт	кВт	
A	22,20	96,3	0,71	63,5		9,8			9,8	
	22,74	185,5	0,75	78,5		15,7			15,7	
	23,28	244,1	0,79	81,3		20,5			20,5	
	23,82	291,0	0,83	81,0		25,0			25,0	
	24,36	331,4	0,87	79,7		29,6			29,6	
	24,91	367,4	0,90	78,0		34,3			34,3	
	25,45	400,2	0,94	76,2		39,1			39,1	
	25,99	430,4	0,97	74,5		43,9			43,9	
	B	26,53	458,7	1,00	72,8		47,9			47,9
		26,53	458,7	0,78	65,2	80,39	12,8	33,2		46,0

Окончание таблицы 6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	27,13	488,0	0,80	72,6	81,06	16,0	32,7		48,8
	27,72	515,6	0,83	77,4	81,64	19,3	32,2		51,6
	28,32	541,8	0,85	80,3	82,10	22,8	31,7		54,5
	28,92	566,8	0,88	81,7	82,45	26,6	31,1		57,7
	29,51	590,7	0,91	82,1	82,68	30,7	30,6		61,3
	30,11	613,7	0,94	81,8	82,76	35,1	30,0		65,1
	30,70	635,8	0,97	81,0	82,70	39,9	29,3		69,3
C	31,30	657,3	1,00	79,8	82,47	44,3	28,7		73,0
	31,30	657,3	0,85	68,8	82,47	17,3	28,7	28,7	74,7
	31,64	669,1	0,86	73,0	82,26	19,8	28,3	28,3	76,3
	31,98	680,7	0,88	76,3	81,98	22,3	27,9	27,9	78,1
	32,31	692,1	0,90	78,8	81,64	25,0	27,5	27,5	79,9
	32,65	703,4	0,91	80,6	81,23	27,8	27,0	27,0	81,8
	32,99	714,4	0,93	81,8	80,74	30,8	26,6	26,6	83,9
	33,33	725,3	0,95	82,4	80,17	34,0	26,1	26,1	86,2
	33,66	736,0	0,97	82,5	79,51	37,5	25,6	25,6	88,7
D	34,00	746,6	0,99	82,3	78,76	40,5	25,0	25,0	90,6

**Расчет индекса экологичной эксплуатации.** Расчет средневзвешенного отклонения потребляемой насосом энергии от оптимального значения (индекс удельного перерасхода энергии)  $\Delta E$  производится при помощи выражения для каждого насоса в пределах режимной характеристики во всем диапазоне водопотребления от  $Q_{\min}$  до  $Q_{\max}$ . Результат расчета приведен в таблице 7.

Таблица 7. – Оценка экологичности эксплуатации насосного оборудования

Режим	$H_{гр}$ м	$Q_{гр}$ м <sup>3</sup> /ч	$\Delta E_{рег}$	$\Delta E_{нрег}$	$\Delta E_{нрег2}$	$\Sigma \Delta E$	
A	22,20	96,3	0,28			0,28	
	22,74	185,5	0,06			0,06	
	23,28	244,1	0,05			0,05	
	23,82	291,0	0,08			0,08	
	24,36	331,4	0,12			0,12	
	24,91	367,4	0,17			0,17	
	25,45	400,2	0,22			0,22	
	25,99	430,4	0,28			0,28	
	B	26,53	458,7	0,31			0,31
		26,53	458,7	0,49	0,04		0,16
27,13		488,0	0,37	0,02		0,14	
27,72		515,6	0,31	0,01		0,12	
28,32		541,8	0,29	0,01		0,13	
28,92		566,8	0,30	0,02		0,15	
29,51		590,7	0,32	0,04		0,18	
30,11		613,7	0,35	0,06		0,22	
30,70		635,8	0,39	0,08		0,26	
C		31,30	657,3	0,41	0,11		0,29
	31,30	657,3	0,67	0,11	0,11	0,24	
	31,64	669,1	0,59	0,12	0,12	0,24	
	31,98	680,7	0,54	0,14	0,14	0,25	
	32,31	692,1	0,50	0,15	0,15	0,26	
	32,65	703,4	0,48	0,17	0,17	0,28	
	32,99	714,4	0,48	0,19	0,19	0,30	
	33,33	725,3	0,48	0,21	0,21	0,32	
	33,66	736,0	0,50	0,23	0,23	0,34	
	D	34,00	746,6	0,48	0,26	0,26	0,36
Сумма по НС:						5,81	

Из таблицы 7 видно, что область минимальных значений индекса  $\Delta E$  совпадает с областью наиболее вероятного значения водопотребления  $Q_{пт}$ , что свидетельствует основным положениям ГОСТ 33969-2016<sup>5</sup> о высокой энергоэффективности выбранных режимов работы подобранного насосного оборудования. Графически результаты расчета представлены на рисунке 5.

<sup>5</sup> URL: <https://tnpa.by/#!/DocumentCard/362384/530403>.

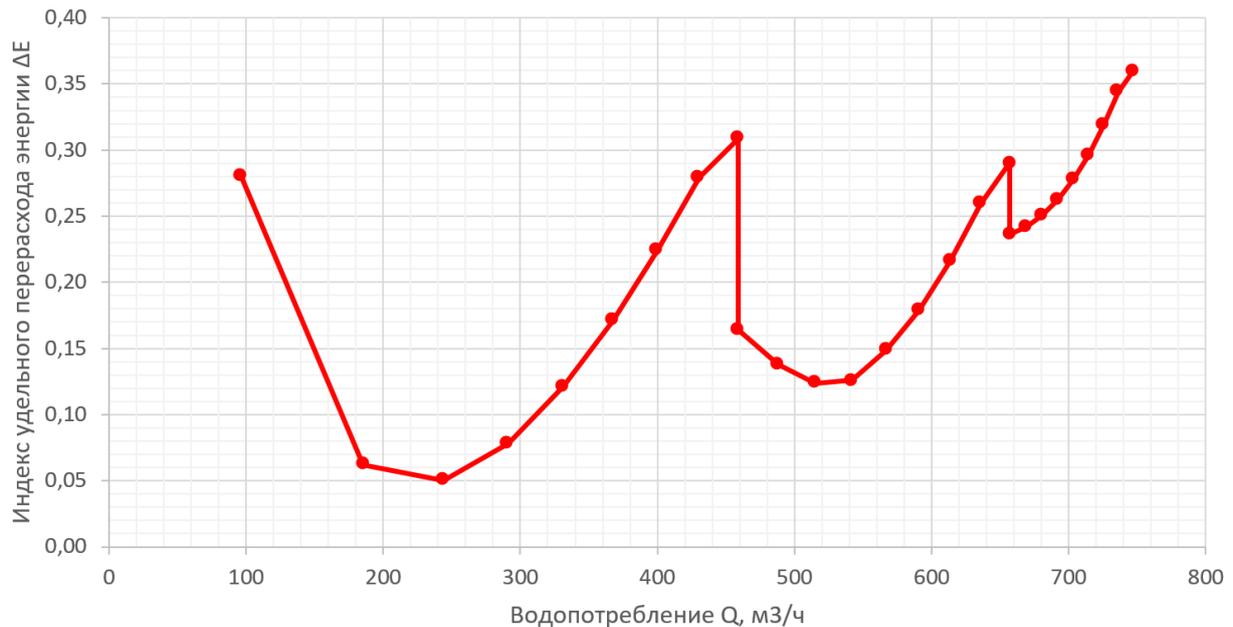


Рисунок 5. – Индекс удельного перерасхода энергии при использовании ЧРЭП

**Расчет энергопотребления за расчетный период.** Зная зависимость мгновенной потребляемой мощности от водопотребления и зависимость обеспеченности водопотребления (см. выше), находим обеспеченность мгновенной потребляемой мощности  $N_i$ :

$$p_i = f(N_i). \quad (13)$$

Объем электроэнергии, затраченной насосной станцией на транспортирование воды потребителю за расчетный период, в таком случае будет определяться интегралом функции (13). Интегрируя уравнение (3) в пределах от  $Q_{\min}$  до  $Q_{\max}$ , получим объем водопотребления за расчетный период  $\Sigma V$ . Результаты расчетов представлены в таблице 8.

Удельное энергопотребление в данном случае определяется из выражения:

$$w_{\text{уд}} = \frac{W_{\text{рег}}}{\Sigma V} = \frac{263613,6}{2779524} = 0,095 \text{ кВт/м}^3.$$

Таблица 8. – Расчет потребляемой энергии за расчетный период

Режим	$H_{\text{тр}}$	$Q_{\text{тр}}$	$\Sigma N$	$p_i$	$W_{\text{рег}}$	$\Sigma V$
1	2	3	4	5	6	7
	м	м <sup>3</sup> /ч	кВт	ч	кВт·ч	м <sup>3</sup>
A	22,20	96,3	9,8	8467,96		
	22,74	185,5	15,7	7285,14	15119,92	166670,73
	23,28	244,1	20,5	5980,98	23589,77	280114,94
	23,82	291,0	25,0	4841,04	25928,81	304986,78
	24,36	331,4	29,6	3879,56	26290,42	299247,27
	24,91	367,4	34,3	3079,99	25576,78	279388,89
	25,45	400,2	39,1	2421,49	24173,09	252723,50
	25,99	430,4	43,9	1884,25	22304,85	223119,56
	26,53	458,7	47,9	1450,50	19918,69	192836,73
	26,53	458,7	46,0	1450,50	0,00	0,00
27,13	488,0	48,8	1073,84	17852,05	178293,24	
27,72	515,6	51,6	785,53	14462,25	144665,87	
28,32	541,8	54,5	569,67	11449,27	114119,42	
28,92	566,8	57,7	412,32	8831,91	87207,89	
29,51	590,7	61,3	301,24	6609,58	64289,05	
30,11	613,7	65,1	225,53	4782,89	45589,55	
30,70	635,8	69,3	175,52	3360,58	31246,19	
C	31,30	657,3	73,0	142,52	2346,73	21332,95
	31,30	657,3	74,7	142,52	0,00	0,00
	31,64	669,1	76,3	128,39	1066,61	9367,73
	31,98	680,7	78,1	115,90	964,62	8432,20
	32,31	692,1	79,9	103,80	955,32	8303,86
	32,65	703,4	81,8	90,93	1040,40	8979,75
	32,99	714,4	83,9	76,18	1222,11	10455,94

Окончание таблицы 8

1	2	3	4	5	6	7
	33,33	725,3	86,2	58,50	1503,63	12727,65
	33,66	736,0	88,7	36,89	1889,34	15789,41
<i>D</i>	34,00	746,6	90,6	10,41	2373,97	19635,20
					263 613,58	2 779 524

**Оценка экологического эффекта.** Пересчет затрат электроэнергии на потребления условного топлива за расчетный период  $T$ :

$$G_{\text{ТУТ}} = W_{\text{рег}} \cdot q_{\text{ТУТ}} = 263613,6 \cdot \frac{238,5}{10^6} = 62,87 \text{ тУТ/год},$$

где  $q_{\text{ТУТ}}$  – удельный расход условного топлива в г/кВт·ч на отпуск электроэнергии по энергосистеме в целом по данным Национального статистического комитета Республики Беларусь и ГПО «Белэнерго»<sup>6</sup>.

Количество выброшенных парниковых газов при генерации энергии, затраченной насосной станцией на транспортирование воды за расчетный период  $T$  в  $\text{CO}_2$ -эквиваленте:

$$G_{\text{CO}_2} = W_{\text{рег}} \cdot q_{\text{CO}_2} = 263613,6 \cdot \frac{340,6}{10^6} = 89,78 \text{ тCO}_2/\text{год},$$

где  $q_{\text{CO}_2}$  – удельное значение выбросов парниковых газов в  $\text{CO}_2$ -эквиваленте на генерацию 1 кВт·ч электроэнергии в г. $\text{CO}_2$ -экв/кВт·ч по данным [10] и Национального статистического комитета Республики Беларусь и ГПО «Белэнерго»<sup>7</sup>.

**Расчет и анализ режимов работы насосной станции при регулировании дросселированием.** Пользуясь тем же порядком рассуждений, что был применен ранее, произведем расчет режимов работы насосной станции при использовании дросселирования в качестве способа регулирования режимов работы насосного оборудования. Последовательность работы насосного оборудования принимается следующая: участок  $A-B$  – водопотребление обеспечивает один насос Д125-400В, участок  $B-C$  – водопотребление обеспечивается за счет параллельной работы двух насосов Д125-400В и Д125-400В-а, участок  $C-D$  – водопотребление поддерживается за счет параллельной работы одного насоса Д125-400В и двух насосов Д125-400В-а (рисунок 6). Режимные характеристики определяются в ходе следующих рассуждений:

а) при работе одного насоса Д125-400В в диапазоне от  $Q_{\min}$  до  $Q_B$  его режимная характеристика определяется  $Q-H$  характеристикой насоса (см. таблицу 3) на участке  $E-B$ ;

б) при параллельной работе двух насосов – одного Д125-400В и одного Д125-400В-а в диапазоне водопотребления от  $Q_B$  до  $Q_C$  режимные характеристики каждого насоса будут –  $F'-C'$  для насоса Д125-400В и  $F''-C''$  для насоса Д125-400В-а. Суммарная характеристика работы насосов будет  $F-C$ ;

в) при параллельной работе трех насосов – одного Д125-400В и двух Д125-400В-а с двумя нерегулируемыми насосами в диапазоне водопотребления от  $Q_C$  до  $Q_D$  режимные характеристики каждого насоса будут –  $G'-D'$  для насоса Д125-400В и  $G''-D''$  для насосов Д125-400В-а. Суммарная характеристика работы насосов будет  $G-D$ .

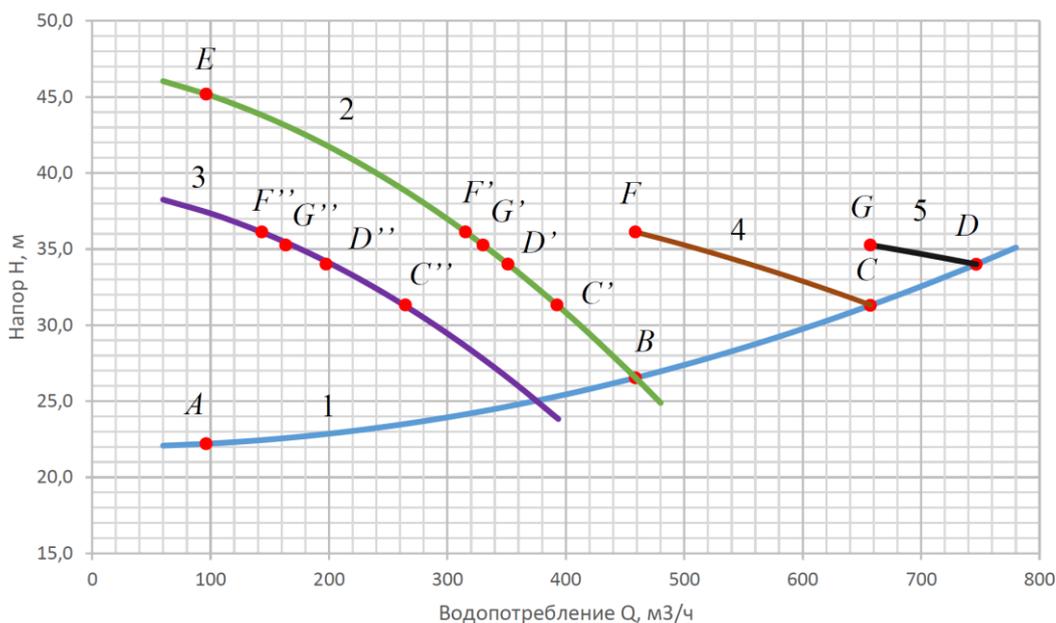


Рисунок 6. – Режимы работы насосной станции при дросселировании

<sup>6</sup> URL: [https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/publications/izdania/public\\_compilation/index\\_39984/](https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/publications/izdania/public_compilation/index_39984/).

<sup>7</sup> См. сноску 6.

Результаты расчетов режимов работы насосного оборудования, потребляемой мощности, экологичности эксплуатации и потребляемой энергии за расчетный период приведены в таблицах 9, 10, 11 и 12 соответственно.

Пересчет затрат электроэнергии на потребления условного топлива за расчетный период  $T$  при использовании дросселирования производим, используя выражение:

$$G'_{\text{тут}} = W_{\text{д}} \cdot q_{\text{тут}} = 35440,83 \cdot \frac{238,5}{10^6} = 84,53 \text{ тут/год.}$$

Количество выброшенных парниковых газов при генерации энергии, затраченной насосной станцией на транспортирование воды за расчетный период  $T$  в  $\text{CO}_2$ -эквиваленте, рассчитываем, используя выражение:

$$G'_{\text{CO}_2} = W_{\text{д}} \cdot q_{\text{CO}_2} = 354403,83 \cdot \frac{340,6}{10^6} = 120,71 \text{ тCO}_2/\text{год.}$$

Таблица 9. – Результаты расчета режимов работы насосной станции во всем диапазоне водопотребления

Режим	$H_{\text{тр}}$ м	$Q_{\text{тр}}$ м <sup>3</sup> /ч	$H_{\text{нас}}$ м	$Q_{\text{н1}}$ м <sup>3</sup> /ч	$Q_{\text{н2}}$ м <sup>3</sup> /ч	
А	22,20	96,3	45,18	96,3		
	22,74	185,5	42,30	185,5		
	23,28	244,1	39,81	244,1		
	23,82	291,0	37,46	291,0		
	24,36	331,4	35,19	331,4		
	24,91	367,4	32,98	367,4		
	25,45	400,2	30,81	400,2		
	25,99	430,4	28,67	430,4		
	26,53	458,7	26,55	458,7		
В	26,53	458,7	36,12	315,4	143,3	
	27,13	488,0	35,52	325,8	162,2	
	27,72	515,6	34,93	335,9	179,6	
	28,32	541,8	34,33	345,9	195,9	
	28,92	566,8	33,73	355,6	211,1	
	29,51	590,7	33,13	365,1	225,6	
	30,11	613,7	32,53	374,5	239,2	
	30,70	635,8	31,93	383,6	252,2	
	С	31,30	657,3	31,33	392,6	264,7
		31,30	657,3	35,27	330,2	163,5
31,64		669,1	35,11	332,9	168,1	
31,98		680,7	34,95	335,6	172,6	
32,31		692,1	34,79	338,2	177,0	
32,65		703,4	34,63	340,8	181,3	
32,99		714,4	34,47	343,4	185,5	
33,33		725,3	34,32	346,0	189,6	
33,66	736,0	34,16	348,6	193,7		
Д	34,00	746,6	34,00	351,2	197,7	

Таблица 10. – Результаты расчетов потребляемой мощности при дросселировании

Режим	$H_{\text{тр}}$	$Q_{\text{тр}}$	$\eta_{\text{н1}}$	$\eta_{\text{н2}}$	$N_{\text{н1}}$	$N_{\text{н2}}$	$\sum N$
1	2	3	4	5	6	7	8
	м	м <sup>3</sup> /ч	%	%	кВт	кВт	кВт
А	22,20	96,3	60,4		20,6		20,6
	22,74	185,5	75,0		30,0		30,0
	23,28	244,1	80,5		34,6		34,6
	23,82	291,0	82,5		37,9		37,9
	24,36	331,4	82,6		40,5		40,5
	24,91	367,4	81,4		42,7		42,7
	25,45	400,2	79,2		44,6		44,6
	25,99	430,4	76,3		46,3		46,3
	26,53	458,7	72,9		47,9		47,9
В	26,53	458,7	82,8	71,2	39,5	20,9	60,3

Окончание таблицы 10

1	2	3	4	5	6	7	8
	27,13	488,0	82,7	74,0	40,1	22,3	62,4
	27,72	515,6	82,5	76,3	40,8	23,6	64,3
	28,32	541,8	82,3	78,1	41,4	24,7	66,0
	28,92	566,8	81,9	79,5	42,0	25,7	67,6
	29,51	590,7	81,5	80,7	42,5	26,6	69,1
	30,11	613,7	81,0	81,5	43,1	27,4	70,5
	30,70	635,8	80,5	82,1	43,6	28,1	71,8
C	31,30	657,3	79,8	82,5	44,2	28,8	73,0
	31,30	657,3	82,6	74,2	40,4	44,6	85,0
	31,64	669,1	82,6	74,8	40,6	45,2	85,8
	31,98	680,7	82,5	75,4	40,7	45,9	86,6
	32,31	692,1	82,5	76,0	40,9	46,5	87,4
	32,65	703,4	82,4	76,5	41,1	47,1	88,1
	32,99	714,4	82,3	77,0	41,2	47,6	88,8
	33,33	725,3	82,3	77,4	41,4	48,2	89,5
	33,66	736,0	82,2	77,9	41,5	48,7	90,2
D	34,00	746,6	82,1	78,3	41,7	49,2	90,9

Таблица 11. – Оценка экологичности эксплуатации насосного оборудования при дросселировании

Режим	$H_{тр}$ м	$Q_{тр}$ м <sup>3</sup> /ч	$\Delta E_{1н}$	$\Delta E_{2н}$	$\Sigma \Delta E'$
A	22,20	96,3	0,756		0,76
	22,74	185,5	0,325		0,32
	23,28	244,1	0,162		0,16
	23,82	291,0	0,066		0,07
	24,36	331,4	0,000		0,00
	24,91	367,4	0,049		0,05
	25,45	400,2	0,087		0,09
	25,99	430,4	0,118		0,12
B	26,53	458,7	0,144		0,14
	26,53	458,7	0,025	0,479	0,35
	27,13	488,0	0,009	0,399	0,29
	27,72	515,6	0,006	0,334	0,25
	28,32	541,8	0,020	0,281	0,22
	28,92	566,8	0,033	0,236	0,20
	29,51	590,7	0,046	0,197	0,18
	30,11	613,7	0,057	0,163	0,16
	30,70	635,8	0,068	0,133	0,15
	31,30	657,3	0,078	0,107	0,13
C	31,30	657,3	0,002	0,385	0,41
	31,64	669,1	0,002	0,367	0,39
	31,98	680,7	0,006	0,351	0,37
	32,31	692,1	0,009	0,335	0,36
	32,65	703,4	0,013	0,319	0,35
	32,99	714,4	0,017	0,305	0,33
	33,33	725,3	0,020	0,291	0,32
	33,66	736,0	0,024	0,278	0,31
	34,00	746,6	0,027	0,266	0,30
	D				

Таблица 12. – Расчет потребляемой энергии за расчетный период при дросселировании

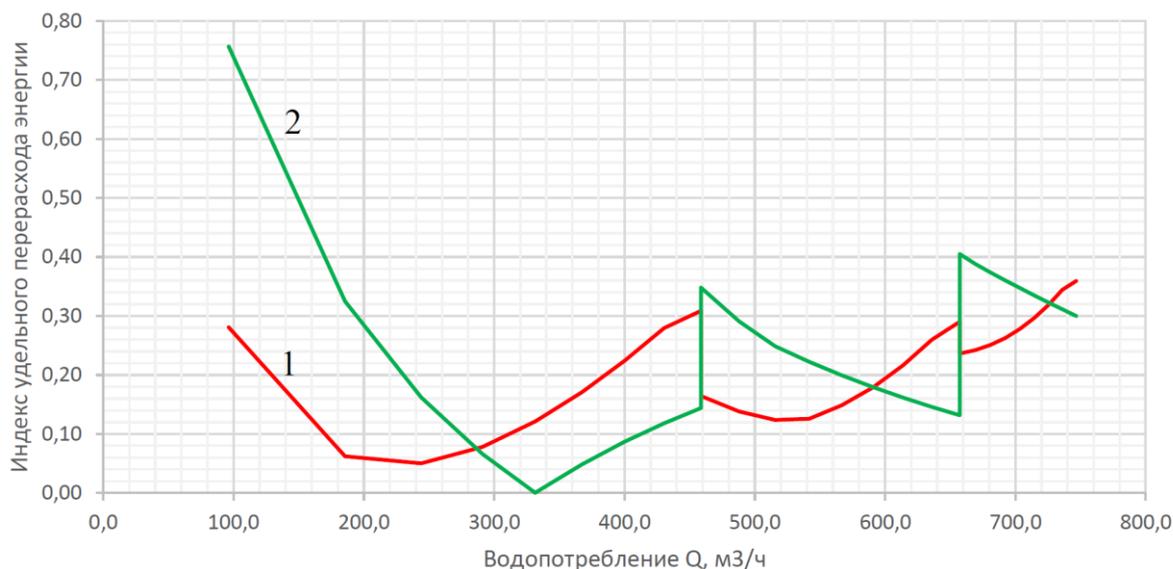
Режим	$H_{тр}$	$Q_{тр}$	$\Sigma N$	$p_i$	$W_d$
1	2	3	4	5	6
	м	м <sup>3</sup> /ч	кВт	ч	кВт·ч
A	22,20	96,3	20,6	8467,96	
	22,74	185,5	30,0	7285,14	29954,89
	23,28	244,1	34,6	5980,98	42135,82

Окончание таблицы 12

1	2	3	4	5	6
	23,82	291,0	37,9	4841,04	41316,66
	24,36	331,4	40,5	3879,56	37664,60
	24,91	367,4	42,7	3079,99	33239,51
	25,45	400,2	44,6	2421,49	28733,98
	25,99	430,4	46,3	1884,25	24428,49
B	26,53	458,7	47,9	1450,50	20445,17
	26,53	458,7	60,3	1450,50	0,00
	27,13	488,0	62,4	1073,84	23118,25
	27,72	515,6	64,3	785,53	18272,90
	28,32	541,8	66,0	569,67	14070,63
	28,92	566,8	67,6	412,32	10515,48
	29,51	590,7	69,1	301,24	7593,55
	30,11	613,7	70,5	225,53	5282,49
	30,70	635,8	71,8	175,52	3556,24
C	31,30	657,3	73,0	142,52	2387,56
	31,30	657,3	85,0	142,52	0,00
	31,64	669,1	85,8	128,39	1205,90
	31,98	680,7	86,6	115,90	1076,77
	32,31	692,1	87,4	103,80	1052,11
	32,65	703,4	88,1	90,93	1129,10
	32,99	714,4	88,8	76,18	1304,97
	33,33	725,3	89,5	58,50	1577,02
	33,66	736,0	90,2	36,89	1942,59
D	34,00	746,6	90,9	10,41	2399,13
					354 403,83

**Сравнение результатов расчета режимов работы насосного оборудования при частотном регулировании и дросселировании.** Проанализируем результаты расчетов режимов работы насосного оборудования при регулировании с использованием ЧРЭП и при дросселировании.

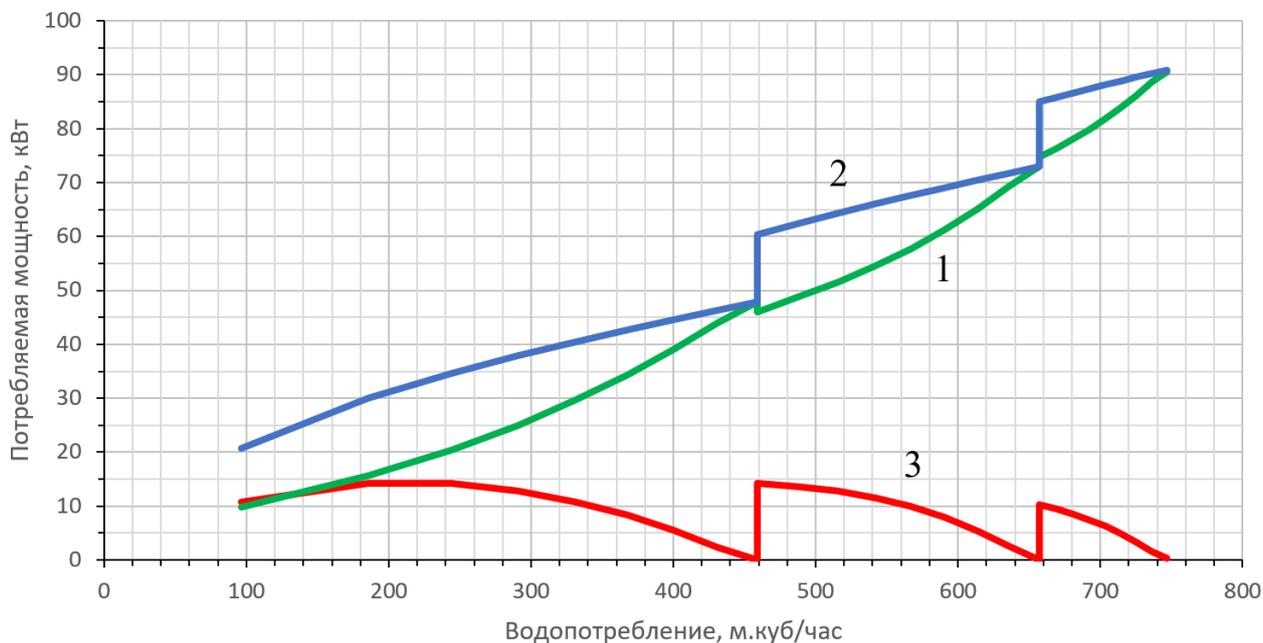
На рисунке 7 приведены кривые индекса перерасхода энергии для двух рассмотренных способов регулирования. В ряде режимов наблюдается более экологичная эксплуатация насосного оборудования при дросселировании, чем при использовании ЧРЭП. Это возможно объяснить наличием дополнительных потерь энергии в электроприводе ( $\approx 2\%$ ), а также изменением КПД насоса при снижении частоты вращения рабочего колеса. Но в целом, по суммарному показателю режимы работы насосного оборудования более экологичны при частотном регулировании, нежели при дросселировании.



1 – кривая индекса  $\Delta E$  варианта с частотным регулированием; 2 – кривая индекса  $\Delta E$  варианта с дросселированием

Рисунок 7. – Индекс удельного перерасхода энергии при использовании ЧРЭП

На рисунке 8 приведено сравнение мгновенной потребляемой мощности насосной станцией при частотном регулировании, при дросселировании и их разнице. Очевидно, что при частотном регулировании мгновенная потребляемая мощность ниже во всех рассматриваемых режимах за исключением переходных режимов *B*, *C* и *D*, в которых энергопотребление насосного оборудования сравнивается в обоих вариантах.



1 – график потребляемой мощности при частотном регулировании; 2 – график потребляемой мощности при дросселировании; 3 – результирующая разница потребляемой мощности при дросселировании и частотном регулировании

Рисунок 8. – Сравнение мгновенной потребляемой мощности насосной станцией при частотном регулировании и при дросселировании

Величина экономии потребляемой электроэнергии при частотном регулировании определяется:

$$\Delta W = W_{\text{д}} - W_{\text{рег}} = 354403,83 - 263613,58 = 90790,25 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год.}$$

Сравнив полученные значения потребления условного топлива при использовании ЧРЭП и дросселирования, оцениваем экологический эффект по уровню снижения потребления условного топлива:

$$\Delta G_{\text{ТУТ}} = G'_{\text{ТУТ}} - G_{\text{ТУТ}} = 84,53 - 62,87 = 21,66 \text{ туг/год}$$

и выброса парниковых газов в  $\text{CO}_2$ -эквиваленте:

$$\Delta G_{\text{CO}_2} = G'_{\text{CO}_2} - G_{\text{CO}_2} = 120,71 - 89,87 = 30,84 \text{ тCO}_2/\text{год}.$$

Таким образом, снижение антропогенной нагрузки на окружающую среду составит на 21,66 туг/год и 89,87 т $\text{CO}_2$ -экв меньше при использовании ЧРЭП для регулирования режимов работы рассматриваемой насосной станции по сравнению с использованием для тех же целей дросселирования.

**Расчет потребляемой энергии насосной станцией за расчетный период при помощи альтернативных методов. Сравнение результатов.** Для сравнительного анализа разработанной методики расчета режимов работы насосного оборудования и энергопотребления за расчетный период произведем сравнительный расчет по альтернативной методике Б.С. Лезнова [6].

Определим энергозатраты за расчетный период при использовании частотного регулирования режимов работы:

$$W_{\text{рег}} = \frac{N_{\text{б}} \cdot T \cdot (1 + \lambda)}{\eta_{\text{эд}} \cdot 4} \cdot \left[ (1 + H_{\text{п}}^*) + \lambda^2 \cdot (1 - H_{\text{п}}^*) \right] =$$

$$= \frac{85,4 \cdot 8760 \cdot (1 + 0,129)}{0,95 \cdot 4} \cdot \left[ (1 + 0,647) + 0,129^2 \cdot (1 - 0,647) \right] = 275533,5 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год}$$

и при использовании дросселирования:

$$W_d = \frac{N_6 \cdot T \cdot (1 + \lambda)}{\eta_{эд} \cdot 4} \cdot \left[ (1 + H_{\Phi}^*) + \lambda^2 \cdot (1 - H_{\Phi}^*) \right] =$$

$$= \frac{85,4 \cdot 8760 \cdot (1 + 0,129)}{0,95 \cdot 4} \cdot \left[ (1 + 1,15) + 0,129^2 \cdot (1 - 1,15) \right] = 358388,1 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год.}$$

Экономия энергии составит соответственно:

$$\Delta W = W_d - W_{пер} = 358388,1 - 275533,5 = 82855,5 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год.}$$

Можно рассчитать напрямую экономию электроэнергии за расчетный период при внедрении регулируемого привода:

$$W_{рез} = \frac{1}{\eta_{эд}} \cdot N_6 \cdot T \cdot \left[ w_d^* - (1 + \zeta - \eta_{пр}) \right] \cdot \varphi =$$

$$= \frac{1}{0,95} \cdot 85,4 \cdot 8760 \cdot \left[ 0,18 - (1 + 0,02 - 0,98) \right] \cdot 0,75 = 826383,4 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год.}$$

Разница в результатах составляет 0,2%.

Следует отметить, что методика, предложенная Б.С. Лезновым, не позволяет проанализировать и оценить влияние на энергопотребление изменения порядка включения/выключения насосов, оборудования ЧРЭП всех или нескольких насосных агрегатов.

Сравнение результатов расчета по разработанной методике и методике, предложенной Б.С. Лезновым, приведены в таблице 13.

Таблица 13. – Сравнение результатов расчета

Показатель	Ед. изм.	Результаты расчета		
		по разработанной методике	по Б.С. Лезнову	
			по разнице энергозатрат $W_d$ и $W_{пер}$	прямой расчет экономии $W_{рез}$
Расчетное энергопотребление до внедрения ЧРЭП	кВт·ч/год	354403,8	358388,1	–
Расчетное энергопотребление после внедрения ЧРЭП		263613,6	275533,5	–
Расчетная экономия энергоресурсов		90790,2	82855,5	82683,4
Фактическое энергопотребление до внедрения ЧРЭП		357154,6		
Фактическое энергопотребление после внедрения ЧРЭП		267286,8		
Фактическая экономия энергоресурсов		89867,8		
Расхождение расчетных значений с фактическими	%	1,01	8,7	8,5

**Заключение.** Можно сделать следующие выводы:

1. В данной статье на конкретных примерах рассмотрен предложенный авторами подход к подбору насосного оборудования с ЧРЭП, позволяющий обеспечить работу насосов в зоне высоких КПД в течение максимально продолжительного времени при достаточной степени их разнотипности.

2. Описан процесс анализа режимов работы центробежных насосов с ЧРЭП и без во всем диапазоне водопотребления от  $Q_{\min}$  до  $Q_{\max}$ .

3. Произведен сравнительный анализ режимов работы насосных станций с использованием для управления производительностью насосного оборудования ЧРЭП и метода дросселирования. Показано преимущество частотного регулирования перед дросселированием за счет более оптимальных и энергоэффективных режимов работы. Произведен сравнительный расчет объемов потребляемой электроэнергии за расчетный период для насосных станций с использованием частотного регулирования и дросселирования. На конкретном примере показана разница в итоговом энергопотреблении для сравниваемых вариантов управления насосами.

4. Произведен сравнительный расчет экологических показателей для различных вариантов оснащения насосных станций. Обоснована возможность снижения степени антропогенной нагрузки на окружающую среду

в результате внедрения энергоэффективных мероприятий вследствие уменьшения потребления условного топлива и снижения объемов выбросов парниковых газов в атмосферу в пересчете на CO<sub>2</sub>-эквивалент.

5. Произведен расчет объемов потребляемой энергии по альтернативным методикам. В результате сравнения результатов расчета показано, что применение разработанной методологии обеспечивает более высокие показатели энергетической эффективности и углеродной нейтральности при работе насосных станций, по сравнению с традиционно используемыми подходами.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Методические рекомендации по выбору оборудования для частотно-регулируемой насосной станции второго подъема с комбинированной компоновочной схемой / А.П. Гришин [и др.]. – М. : ГНУ ВИЭСХ, 2006. – 74 с.
2. Гуринович, А.Д. Системы питьевого водоснабжения с водозаборными скважинами. Планирование, проектирование, строительство и эксплуатация / А.Д. Гуринович. – Минск : Технопринт, 2001. – 305 с.
3. Еловик, В.Л. Методика расчета и анализа режимов работы насосных агрегатов, оборудованных регулируемым электроприводом / В.Л. Еловик // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. – 2019. – № 2. – С. 204–213.
4. Еловик, В.Л. Методика прямого расчета потребляемой энергии частотно-регулируемым насосом за расчетный период / В.Л. Еловик, Ю.П. Седлухо // Вода: химия и экология. – 2010. – № 7. – С. 46–50.
5. Карасев, Б.В. Насосы и насосные станции : учеб. для вузов / Б.В. Карасев. – Минск : Выш. шк., 1990. – 325 с.
6. Лезнов, Б.С. Методика оценки эффективности применения регулируемого электропривода в водопроводных и канализационных насосных установках / Б.С. Лезнов. – М. : Машиностроение, 2011. – 88 с.
7. Лезнов, Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздухоподводящих установках / Б.С. Лезнов. – М. : Энергоатомиздат, 2006. – 360 с.
8. Старинский, В.П. Технологические гидравлические и техникоэкономические расчеты в водоснабжении : учеб. пособие для вузов / В.П. Старинский. – Минск : Выш. шк., 1985. – 200 с.
9. Фисенко, В.Н. Энергетическая эффективность насосов в системах водоснабжения и водоотведения / В.Н. Фисенко // Водоснабжение и санитарная техника. – 2018. – № 6. – С. 52–63.
10. Черняховская, Ю.В. Выбросы парниковых газов в электроэнергетике и их снижение от внедрения российских проектов атомных электростанций / Ю.В. Черняховская // Вестник МЭИ. – 2017. – № 3. – С. 46–52.
11. Bortoni, E.C. Optimization of parallel variable-speed-driven centrifugal pumps operation / E.C. Bortoni, R. Alves de Almeida, A.N.C. Viana // Energy efficiency. – 2008. – № 1. – P. 167–173.

## REFERENCES

1. Grishin, A.P., Avramenko, M.V., Grishin, V.A., Bolkhovitinov, Yu.B. & Grishin, A.A. (2006). *Metodicheskie rekomendatsii po vyboru oborudovaniya dlya chastotno-reguliruemoi nasosnoi stantsii vtorogo pod"ema s kombinirovannoi komponovochnoi skhemoi*. Moscow: GNU VIESKh. (In Russ.).
2. Gurinovich, A.D. (2001). *Sistemy pit'evogo vodosnabzheniya s vodozabornymi skvazhinami. Planirovanie, proektirovanie, stroitel'stvo i ekspluatatsiya*. Minsk: Tekhnoprint. (In Russ.).
3. Elovik, V.L. (2019). Metodika rascheta i analiza rezhimov raboty nasosnykh agregatov, oborudovannykh reguliruемым электроприводом [Calculation and analyses methodology of the working conditions of pumping units, equipped with adjustable drive]. *Trudy BGTU. Ser. 2, Khimicheskie tekhnologii, biotekhnologii, geoekologiya* [Proceedings of BSTU. Ser. 2, Chemical technologies, biotechnologies, geocology], (2), 204–213. (In Russ., abstr. in Engl.).
4. Elovik, V.L. & Sedlukho, Yu.P. (2010). Metodika pryamogo rascheta potrebyaemoi energii chastotno-reguliruемым насосом за raschetnyi period [Direct calculation of energy consumption by variable-frequency drive during working period]. *Voda: khimiya i ekologiya*, (7), 46–50. (In Russ., abstr. in Engl.).
5. Karasev, B.V. (1990). *Nasosy i nasosnye stantsii*. Minsk: Vysh. shk. (In Russ.).
6. Leznov, B.S. (2011). *Metodika otsenki effektivnosti primeneniya reguliruемого электропривода v vodoprovodnykh i kanalizatsionnykh nasosnykh ustanovkakh*. Moscow: Mashinostroenie. (In Russ.).
7. Leznov, B.S. (2006). *Energoberezhenie i reguliruemyi privod v nasosnykh i vozdukhoduvnykh ustanovkakh*. Moscow: Energoatomizdat. (In Russ.).
8. Starinskii, V.P. (1985). *Tekhnologicheskie gidravlicheskie i tekhnikoekonomicheskie raschety v vodosnabzhenii*. Minsk: Vysh. shk. (In Russ.).
9. Fisenko, V.N. (2018). Energeticheskaya effektivnost' nasosov v sistemakh vodosnabzheniya i vodootvedeniya [Energy efficiency of pumps in water supply and wastewater disposal systems]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* [Water Supply and Sanitary Technique], (6), 52–63. (In Russ., abstr. in Engl.).
10. Chernyakhovskaya, Yu.V. (2017). Vybrosy parnikovyykh gazov v elektroenergetike i ikh snizhenie ot vnedreniya rossiiskikh proektov atomnykh elektrostantsii. *Vestnik MEI*, (3), 46–52. (In Russ.).
11. Bortoni, E.C., Alves de Almeida, R. & Viana, A.N.C. (2008). Optimization of parallel variable-speed-driven centrifugal pumps operation. *Energy efficiency*, (1), 167–173.

Поступила 12.05.2022

**CALCULATION AND ANALYSIS OF OPERATING MODES AND ENERGY CONSUMPTION  
OF CENTRIFUGAL PUMPS WITH FREQUENCY-CONTROLLED ELECTRIC DRIVE  
IN WATER SUPPLY SYSTEMS**

**I. VOITOV, V. YALOVIK**

*The article discusses examples of calculating the operating modes of a centrifugal pump of a water supply and distribution system using a newly developed methodology by the authors. The main points of calculation and analysis of technological, energy and environmental parameters characterizing the operation of centrifugal pumps of water supply and distribution systems are given.*

**Keywords:** *energy efficiency, water supply and distribution systems, pumping unit, variable frequency drive, throttling, reference fuel, greenhouse gases, carbon neutrality.*

УДК 691.32:69.04:693.554-486:691.327

DOI 10.52928/2070-1683-2022-31-8-27-31

**РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ  
ПРИ НОРМАЛЬНОМ ОТРЫВЕ ПО ПРОЧНОСТИ НА РАСТЯЖЕНИЕ ПРИ ИЗГИБЕ**

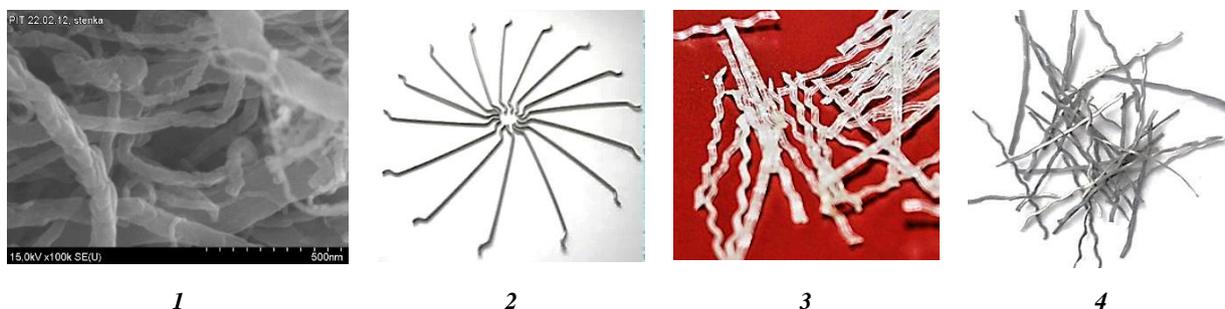
*Е.А. САДОВСКАЯ<sup>1</sup>, д-р техн. наук, проф. С.Н. ЛЕОНОВИЧ<sup>1,2</sup>*  
*(<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск,*  
*<sup>2</sup>Институт Циндао, Китай)*

В данной статье исследовано практическое использование модели Леонова-Панасюка для расчета коэффициента интенсивности напряжений для нанофибробетона с использованием значения прочности на растяжение при изгибе образца-балки  $100 \times 100 \times 400$  мм. Исследование проводилось на разных нанобетонных матрицах с тремя типами фибровых волокон. Сравнение полученных значений показало высокую степень сходимости со значениями коэффициента интенсивности напряжений, полученными по прочности на нормальный отрыв по кубам с надрезом, по энергозатратам при изгибе балки с надрезом. Результаты подтверждают, что критический коэффициент интенсивности напряжений можно отнести к устойчивым показателям трещиностойкости нанофибробетона.

**Ключевые слова:** нанофибробетон, трещиностойкость, вязкость разрушения, коэффициент интенсивности напряжений, нанотрубки, дисперсное армирование, прочность на растяжение.

**Введение.** Бетон представляет собой сложную многоуровневую структуру, в которой каждый уровень оказывает влияние на последующий и на характеристики материала в целом, превращая его в многопараметричную управляемую систему. Введение дисперсного армирования на структурных уровнях позволяет управлять такими уязвимыми параметрами бетона, как прочность на растяжение и трещиностойкость [1].

В данной работе предлагается исследовать бетонный конгломерат (нанофибробетон) с дисперсным армированием на уровне цементирующего вещества и мелкозернистого бетона. В качестве дисперсных волокон предложено использование углеродных нанотрубок [2–6] и различных фибровых волокон макроразмера (рисунок 1) [7; 8].



1 – углеродные нанотрубки [6]; 2 – из стальной проволоки с анкерами (ФПА-1,0);  
3 – полимерная волнистая (ФПВ-0,6-40); 4 – из листовой стали волнового профиля (ФЛВ-0,9-50)

**Рисунок 1. – Фибровые волокна**

В данной статье мы рассмотрим практическое использование модели Леонова-Панасюка [9; 10] для оценки трещиностойкости нанофибробетонов через значение прочности на растяжение при изгибе. Модель Леонова-Панасюка предназначена для описания процесса образования и развития трещины. Полученные значения коэффициентов интенсивности трещин сравним с результатами наших предыдущих равновесных и неравновесных испытаний [11–13].

Модель Леонова-Панасюка является наиболее известным усложнением теории Гриффитса-Ирвина [14]. В ней предполагается, что трещина начнет развиваться, если раскрытие в ее вершине достигнет критического значения. Она используется при анализе процессов разрушения конструкций, изготовленных из многих материалов, однако опыт ее применения для бетонов [9] и фибробетонов невелик. Исследования ученых [10] показывают, что модель качественно правильно описывает многие эффекты, наблюдаемые при квазихрупком разрушении бетона.

Целью исследования является проверка методики расчета коэффициента интенсивности напряжений при нормальном отрыве конструкционного нанофибробетона через прочность на растяжение при изгибе [15; 16].

**Материалы и методы исследования.** Для проведения исследования использовались следующие виды материалов: портландцемент 500Д20 ОАО «Красносельскстройматериалы»; песок строительный I кл.; щебень гра-

нитный III гр.; сульфоалюминатная добавка РСАМ; микрокремнезем конденсированный уплотненный (МКУ-85); химическая добавка Реламикс ПК; наномодифицированная химическая добавка АРТ-Конкрит Р (водная суспензия наноструктурированного углерода (0,01–20 мкм) и пластификатора).

Образцы изготавливались из составов нанобетонных смесей А, Б, В, Г (таблица 1) с добавлением различного типа и количества дисперсных волокон: Ф1 – фибра стальная волновая из листа (80 кг); Ф2 – фибра стальная проволочная анкерная (80 кг); Ф3 – фибра полимерная волнистая (4 кг).

Таблица 1. – Рецептуры исследуемых составов

Состав матрицы	Цемент	РСАМ / МКУ-85	Щебень Фр.5–20 мм	Щебень Фр.5–10 мм	Песок	Химическая добавка «АРТ-КОНКРИТ Р» (% от массы вяжущего)
А	400	–	1020	–	820	3,2 (0,8)
Б	445	–	1035	–	820	2,22 (0,5)
В	460	–	–	880	950	3,22 (0,7)
Г	485	40/45	–	825	800	4,65 (0,7)

*Нормальный отрыв при изгибе балок без надреза.* Испытания на растяжение при изгибе проводились на образцах-призмах 100×100×400 мм (без надреза) по четырехточечной схеме нагружения. Из модифицированной формулы Леонова-Панасюка [14] величину коэффициента интенсивности напряжений можно получить по формуле

$$K_C(f_{fl}) = \frac{0,55 \cdot f_{fl} \cdot \sqrt{2 \cdot \pi \cdot m_0}}{\sqrt{(1+\nu)(1-2\nu)}}, \quad (1)$$

где  $f_{fl}$  – прочность на растяжение при изгибе, МПа;  
 $\nu$  – коэффициент Пуассона;

$$m_0 = k \cdot d_{max}, \quad (2)$$

где  $d_{max}$  – максимальная крупность заполнителя, м;  
 $k$  – коэффициент, принимаемый равным 1.3 для  $d_{max}=20$  мм, 3 для  $d_{max}=10$  мм [14].

*Нормальный отрыв по кубам с надрезом.* Для испытаний использовались образцы-кубы 100×100×100 мм с симметричными надрезами глубиной  $h/4$  (где  $h$  – высота куба), выполненных с помощью режущих инструментов с алмазным напылением. Испытания проводятся при внецентренном сжатии (рисунок 2). Нагружение осуществляется до момента разделения образца на две части или образования трещины, и регистрируется значение разрушения  $F_{IC}$ .

Значение критического коэффициента интенсивности напряжения на нормальный отрыв рассчитывается по формуле [11]:

$$K_C^* = \frac{F_{IC}}{b \cdot h^{1/2}} \left[ 18,3 \left( \frac{a}{h} \right)^{1/2} - 430 \left( \frac{a}{h} \right)^{3/2} + 3445 \left( \frac{a}{h} \right)^{5/2} - 11076 \left( \frac{a}{h} \right)^{7/2} + 12967 \left( \frac{a}{h} \right)^{9/2} \right], \quad (3)$$

где  $F_{IC}$  – нагрузка, при которой происходит разрушение, МН;  
 $b$  – ширина образца, м;  
 $h$  – высота образца, м;  
 $a$  – глубина надреза, м,  $a = h/4$ .

*Нормальный отрыв при изгибе балок с надрезом.* Образцы-призмы 100×100×400 мм с надрезом в средней трети испытывались на растяжение при изгибе ( $f_{ct,l}$ ) по четырехточечной схеме нагружения с фиксированием полной равновесной диаграммы разрушения [12] (см. рисунок 2).

Статический критический коэффициент интенсивности напряжений (рисунок 3) (ГОСТ 29167):

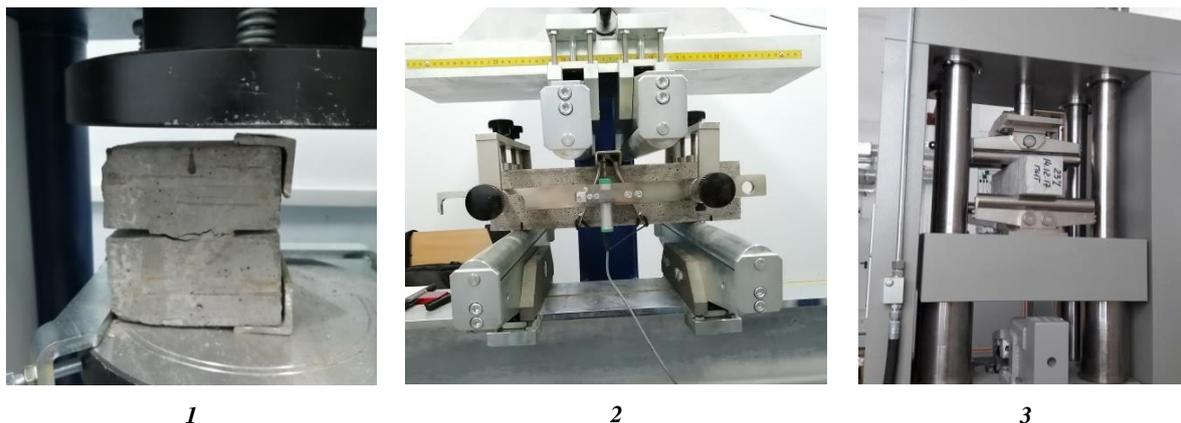
$$K_i = \sqrt{G_i E_b}, \quad (4)$$

где  $G_i$  – удельные энергозатраты на статическое разрушение до момента начала движения магистральной трещины Дж/м<sup>2</sup>;

$E_b$  – начальный модуль упругости нанофибробетона (ГПа), определяется по формуле (СП 52-104-2006):

$$E_{fb} = E_b (1 - \mu_{fv}) + \mu_f E_f, \quad (5)$$

где  $E_b$  – модуль упругости бетона, здесь принят нормативный;  
 $E_f$  – модуль упругости фибры;  
 $\mu_f$  – коэффициент фибрового армирования по объему.



1 – нормальный отрыв по кубам 100×100×100 мм с надрезами; 2 – растяжение при изгибе балок 100×100×400 мм с надрезом; 3 – растяжение при изгибе балок 100×100×400 мм по четырехточечной схеме нагружения

Рисунок 2. – Испытание нановолокнистых образцов

Таблица 2. – Результаты испытаний

Состав	Прочность на растяжение при изгибе, МПа	Критический коэффициент интенсивности напряжений, МПа√м			Коэффициент вариации CV
		$f_{fl}$	$K_i$	$K_c$	
А-Ф0	2,65	–	0,68	0,69	1%
Б-Ф0	3,93	–	1,05	1,03	1%
В-Ф0	3,04	–	0,95	0,56	7%
Г-Ф0	6,82	–	1,23	1,26	31%
А-Ф1	5,50	2,7	3,37	1,44	39%
Б-Ф1	5,51	1,0	1,01	1,44	22%
В-Ф1	6,50	1,8	2,05	1,20	8%
Г-Ф1	5,63	1,4	1,61	1,04	6%
А-Ф2	4,86	1,4	2,60	1,12	41%
Б-Ф2	6,58	1,8	2,24	1,51	15%
В-Ф2	4,70	1,4	1,32	1,32	2%
Г-Ф2	6,90	1,6	1,97	1,94	11%
А-Ф3	4,95	0,8	0,97	1,14	25%
Б-Ф3	4,41	1,17	0,99	1,01	9%
В-Ф3	2,68	0,8	0,69	0,75	11%
Г-Ф3	5,65	1,3	1,37	1,59	10%

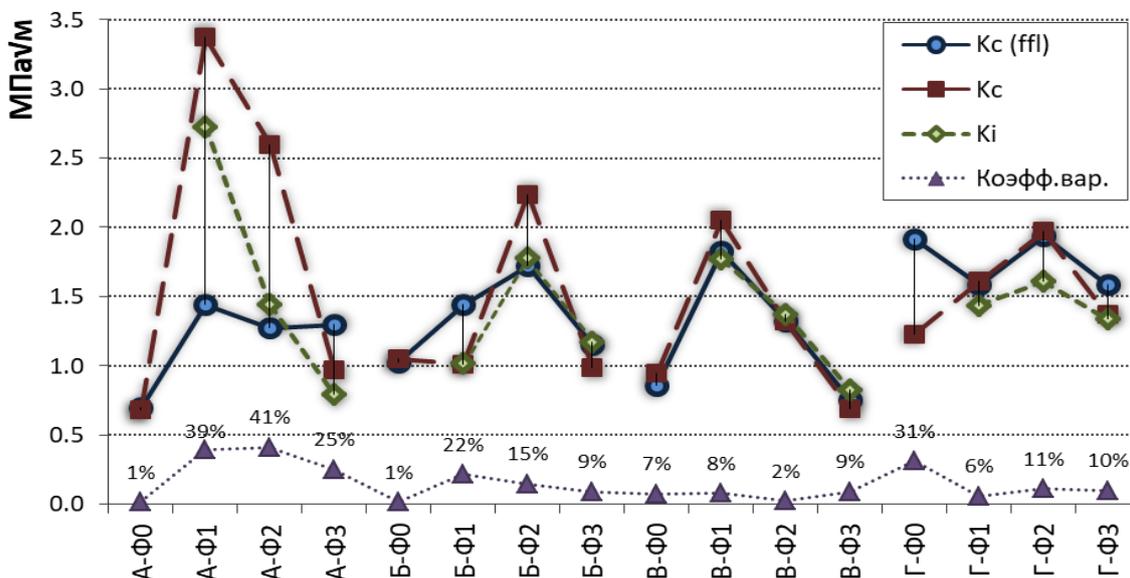


Рисунок 3. – Коэффициент интенсивности напряжений для нановолокнистого бетона

**Анализ результатов.** Для составов без фибрового армирования значение  $K_c(f_{fl})$  полностью совпало с результатами неравновесных испытаний, за исключением состава Г. В составе А с фиброй наблюдается наибольшее расхождение показателей трещиностойкости  $CV=25..41\%$ . Почти во всех составах тенденция изменения  $K_c(f_{fl})$  совпадает коэффициентами интенсивности напряжений равновесных и неравновесных испытаний.

Причины, по которым в составах А-Ф1, А-Ф2, А-Ф3, Б-Ф1, Г-Ф0 значение коэффициента вариации достаточно велико, стоит искать в характеристиках данных составов по дополнительным испытаниям.

**Заключение.** В результате исследования можно сделать следующие выводы:

1. Коэффициент интенсивности напряжений для нанофибробетона зависит от прочности на растяжение при изгибе и может быть получен расчетным путем.
2. Значения коэффициента интенсивности напряжений, полученные по невязаным испытаниям (прочность на нормальный отрыв по кубам с надрезом, энергозатраты при изгибе балки с надрезом, прочность на растяжение при изгибе балки без надреза), показали высокую степень сходимости, что свидетельствует о том, что такой параметр, как критический коэффициент интенсивности напряжений, можно отнести к устойчивым показателям трещиностойкости нанофибробетона.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Коледа, Е.А. Характеристики трещиностойкости фибробетона как определяющий фактор качества / Е.А. Коледа, С.Н. Леонович // *Технология строительства и реконструкции : сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф. / Белорус. нац. техн. ун-т ; Нац. акад. наук Беларуси ; под ред. Б.М. Хрусталева, С.Н. Леоновича. – Минск : Белорус. нац. техн. ун-т, 2017. – С. 282–287.*
2. Fracture toughness of carbon nanotubes modified cement based materials / S.A. Zhdanok [et al.] // *Vestnik of Brest State Technical University. – 2021. – № 3. – P. 48–53. DOI: 10.36773/1818-1112-2021-126-3-48-53.*
3. Физико-механические свойства бетона средней прочности модифицированного углеродной наноструктурированной добавкой / Е.А. Коледа [и др.] // *Вестн. Поволжского гос. технол. ун-та. Сер. Материалы. Конструкции. Технологии. – 2018. – № 2. – С. 24–34.*
4. Полонина, Е.Н. Физико-механические характеристики нанобетона / Е.Н. Полонина, С.Н. Леонович, Е.А. Коледа // *Вестн. Инженерной шк. Дальневосточного федерального ун-та. – 2018. – № 4 (37). – С. 100–111. DOI: 10.5281/zenodo.2008672.*
5. Cement-Based Materials Modified with Nanoscale Additives / E.N. Polonina [et al.] // *Science and Technique. – 2021. – Vol. 20, № 3. – P. 189–194. DOI: 10.21122/2227-1031-2021-20-3-189-194.*
6. Нанотехнологии в строительном материаловедении: реальность и перспективы / С.А. Жданок [и др.] // *Вестн. Белорус. нац. техн. ун-та. – 2009. – № 3. – С. 5–23.*
7. Прочность нанофибробетона на растяжение / Е.А. Садовская [и др.] // *Инженерно-физический журнал. – 2020. – Т. 93, № 4. – С. 1051–1055.*
8. Коледа, Е.А. Результаты испытаний нанофибробетона на растяжение с комплексным фибровым армированием / Е.А. Коледа, С.Н. Леонович, С.А. Жданок // *Вестн. Поволжского гос. технол. ун-та. Сер. Материалы. Конструкции. Технологии. – 2018. – № 2. – С. 16–23.*
9. Панасюк, В.В. Оценка трещиностойкости цементного бетона по вязкости разрушения / В.В. Панасюк, Л.Т. Бередицкий, В.М. Чубриков // *Бетон и железобетон. – 1981. – № 2. – С. 19–20.*
10. Ягуст, В.И. Оценка сопротивления развитию трещин в бетонных конструкциях с помощью модели М.Я. Леонова-В.В. Панасюка-Д. Дагдейла. Экспрессинформация / В.И. Ягуст. – М. : ЦИТИ по гражданскому стр-ву и архитектуре, 1981. – 28 с.
11. Садовская, Е.А. Многопараметричная методика оценки показателей качества нанофибробетона для строительной площадки / Е.А. Садовская, С.Н. Леонович, Н.А. Будевич // *Бетон и железобетон. – 2021. – № 4 (606). – С. 20–28.*
12. Tensile Strength of Nanofibrous Concrete / E.A. Sadvovskaya [et al.] // *J. of Engineering Physics and Thermophysics. – 2020. – Vol. 93, № 4. – P. 1015–1019. DOI: 10.1007/s10891-020-02202-8.*
13. Критический коэффициент интенсивности напряжений при поперечном сдвиге для нанофибробетона / Е.А. Садовская [и др.] // *Строительные материалы. – 2021. – № 9. – С. 41–47. – DOI: 10.31659/0585-430X-2021-795-9-41-46.*
14. Трапезников, Л.П. Температурная трещиностойкость массивных бетонных сооружений / Л.П. Трапезников. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 272 с.
15. Fracture Models and Effect of Fibers on Fracture Properties of Cementitious Composites – A Review / P. Zhang [et al.] // *Materials. – 2020. – № 13. DOI: 10.3390/ma13235495.*
16. Hamad, A.J. Flexural and flexural toughness of fiber reinforced concrete – American standard specifications review / A.J. Hamad, R.J.A. Sldozian // *GRD J. for Engineering. – 2019. – Vol. 4, iss. 3. – P. 5–13.*

#### REFERENCES

1. Koleda, E.A. & Leonovich, S.N. (2017). Kharakteristiki treshchinostoikosti fibrobetona kak opredelyayushchii faktor kachestva. In B.M. Khrustalev (Eds.) & S.N. Leonovich (Eds.) *Tekhnologiya stroitel'stva i rekonstruktsii: sb. dokl. Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* (282–287). Minsk: Belorus. nats. tekhn. un-t. (In Russ.).
2. Zhdanok, S.A., Polonina, E.N., Sadvovskaya, E.A. & Leonovich, S.N. (2021). Fracture toughness of carbon nanotubes modified cement based materials. *Vestnik of Brest State Technical University*, (3), 48–53. DOI: 10.36773/1818-1112-2021-126-3-48-53.
3. Koleda, E.A., Leonovich, S.N., Zhdanok, S.A., Polonina, E.N. & Budrevich, N.A. (2018). Fiziko-mekhanicheskie svoystva betona srednei prochnosti modifitsirovannogo uglerodnoi nanostrukturirovannoi dobavkoi [Physical and mechanical properties of medium-strength concrete modified with a carbon nanostructured additive]. *Vestn. Povolzhskogo gos. tekhnol. un-ta. Ser. Materialy. Konstruktiv. Tekhnologii [Vestnik of Volga State University of Technology. Ser. Materials. Constructions. Technologies]*, (2), 24–34. (In Russ., abstr. in Engl.).
4. Polonina, E.N., Leonovich, S.N. & Koleda, E.A. (2018). Fiziko-mekhanicheskie kharakteristiki nanobetona [Physical and mechanical properties of nano concrete]. *Vestn. Inzhenernoi shk. Dal'nevostochnogo federal'nogo un-ta [FEFU: School of Engineering Bulletin]*, (4), 100–111. (In Russ.). DOI: 10.5281/zenodo.2008672.

5. Polonina, E.N., Leonovich, S.N., Khroustalev, B.M., Sadovskaya, E.A. & Budrevich, N.A. (2021). Cement-Based Materials Modified with Nanoscale Additives. *Science and Technique*, 20 (3), 189–194. DOI: 10.21122/2227-1031-2021-20-3-189-194.
6. Zhdanok, S.A., Khroustalev, B.M., Batyanovskii, E.I. & Leonovich, S.N. (2009). Nanotekhnologii v stroitel'nom materialovedenii: real'nost' i perspektivy. *Vestn. Belorus. nats. tekhn. un-ta*, (3), 5–23. (In Russ.).
7. Sadovskaya, E.A., Leonovich, S.N., Zhdanok, S.A. & Polonina, E.N. (2020). Prochnost' nanofibrobetona na rastyazhenie. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal [J. of Engineering Physics and Thermophysics]*, 93 (4), 1051–1055. (In Russ.).
8. Koleda, E.A., Leonovich, S.N. & Zhdanok, S.A. (2018). Rezul'taty ispytaniy nanofibrobetona na rastyazhenie s kompleksnym fibrovym armirovaniem [Results of tension testing of nanofiber concrete with integrated fiber reinforcement]. *Vestn. Povolzhskogo gos. tekhnol. un-ta. Ser. Materialy. Konstruktsii. Tekhnologii [Vestnik of Volga State University of Technology. Ser. Materials. Constructions. Technologies]*, (2), 16–23. (In Russ., abstr. in Engl.).
9. Panasyuk, V.V., Berednitskii, L.T. & Chubrikov, V.M. (1981). Otsenka treshchinostoikosti tsementnogo betona po vyzakosti razrusheniya. *Beton i zhelezobeton*, (2), 19–20. (In Russ.).
10. Yagust, V.I. (1981). *Otsenka soprotivleniya razvitiyu treshchin v betonnykh konstruktsiyakh s pomoshch'yu modeli M.Ya. Leonova-V.V. Panasyuka-D. Dagdeila. Ekspresinformatsiya*. Moscow: TsITI po grazhdanskomu str-vu i arkhitekture. (In Russ.).
11. Sadovskaya, E.A., Leonovich, S.N. & Budrevich, N.A. (2021). Mnogoparametrichnaya metodika otsenki pokazatelei kachestva nanofibrobetona dlya stroitel'noi ploshchadki [A multi-parametric method for evaluating the quality indicators of nano-fiber concrete for a construction site]. *Beton i zhelezobeton*, (4), 20–28. (In Russ., abstr. in Engl.).
12. Sadovskaya, E.A., Polonina, E.N., Leonovich, S.N. & Zhdanok, S.A. (2020). Tensile Strength of Nanofibrous Concrete. *J. of Engineering Physics and Thermophysics*, 93 (4), 1015–1019. DOI: 10.1007/s10891-020-02202-8.
13. Sadovskaya, E.A., Polonina, E.N., Leonovich, S.N., Zhdanok, S.A. & Potapov, V.V. (2021). Kriticheskiy koeffitsient intensivnosti napryazhenii pri poperechnom sdvige dlya nanofibrobetona [Critical stress intensity coefficient at transverse shear for nanofibrobeton]. *Stroitel'nye materialy [Construction Materials]*, (9), 41–47. DOI: 10.31659/0585-430X-2021-795-9-41-46. (In Russ., abstr. in Engl.).
14. Trapeznikov, L.P. (1986). *Temperaturnaya treshchinostoikost' massivnykh betonnykh sooruzhenii*. Moscow: Energoatomizdat. (In Russ.).
15. Zhang, P., Yang, Y., Wang, J., Jiao, M. & Ling, Y. (2020). Fracture Models and Effect of Fibers on Fracture Properties of Cementitious Composites – A Review. *Materials*, (13). DOI: 10.3390/ma13235495.
16. Hamad, A.J. & Sldozian, R.J.A. (2019). Flexural and flexural toughness of fiber reinforced concrete – American standard specifications review. *GRD J. for Engineering*, 4 (3), 5–13.

Поступила 05.04.2022

## RELATIONSHIP OF THE STRESS-INTENSITY COEFFICIENT AT NORMAL SEPARATION AND THE STRENGTH IN TENSION

*E. SADOVSKAYA, S. LEONOVICH*

*This article explores the practical use of the Leonov-Panasyuk model for calculating the stress intensity factor for nanofibre-reinforced concrete using the value of tensile strength in bending of a sample beam of 100×100×400 mm. The study was carried out on different nanoconcrete matrices with three types of fiber fibers. Comparison of the obtained values showed a high degree of convergence with the values of the stress intensity factor obtained from the strength for normal separation in cubes with a notch, from the energy consumption during bending of a beam with a notch. The results confirm that the critical stress intensity factor can be attributed to stable indicators of the crack resistance of nanofiber-reinforced concrete.*

**Keywords:** *nanofibre-reinforced concrete, crack resistance, fracture toughness, stress intensity factor, nanotubes, dispersed reinforcement, deformation diagram, energy consumption.*

УДК 691.32:69.04:693.554-486:691.327

DOI 10.52928/2070-1683-2022-31-8-32-37

## ПРАКТИЧЕСКАЯ АПРОБАЦИЯ МНОГОПАРАМЕТРИЧНОЙ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ФИБРОБЕТОНА НА СТРОИТЕЛЬНОЙ ПЛОЩАДКЕ

*Е.А. САДОВСКАЯ<sup>1</sup>, д-р техн. наук, проф. С.Н. ЛЕОНОВИЧ<sup>1,2</sup>, Н.А. БУДРЕВИЧ<sup>1</sup>*

*(<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск;*

*<sup>2</sup>Институт Циндао, Китай)*

*В данной статье изложены результаты практического применения многопараметричной методики оценки качества фибробетона на строительной площадке. Исследуется монолитный фибробетонный промышленный пол в производственном цеху. Используются методы неразрушающего контроля: упругий отскок, ультразвуковой импульс, ультразвуковая томография. В результате проведенных испытаний получены значения прочности на сжатие, толщина исследуемой конструкции (при одностороннем доступе), однородность материала (пустоты и фибровые «ежи»).*

**Ключевые слова:** *фибробетон, прочность на сжатие, неразрушающий метод контроля, ультразвуковая томография, упругий отскок.*

**Введение.** Фибробетон рекомендуется применять в конструкциях зданий и сооружений, для которых существенное значение имеют снижение собственного веса, уменьшение раскрытия трещин, обеспечение водонепроницаемости бетона, повышение: долговечности, ударной стойкости, сопротивления истиранию и продавливанию [1–8]. Особый интерес в строительстве вызывает проведение контроля качества конструкций в построчных условиях. Так как основу фибробетона составляет бетон-матрица, то и методы контроля, используемые для монолитных бетонных конструкций, будут также применимы и для фибробетона [9]. Предлагаемая авторами методика состоит из трех этапов (таблица 1).

На первом этапе производится сплошной контроль комбинированным (комплексным) методом [10; 11]. В результате измерений ультразвуковым методом и методом упругого отскока получают значение прочности бетонной матрицы. Участки (конструкции) с отличающимися (низкими) показателями испытываются дополнительно на последующих этапах в обязательном порядке.

На втором этапе производится ультразвуковая томография конструкции [12; 13]. Данный метод позволяет определить толщину конструкции и прилегающего к ней основания при одностороннем доступе, обнаружить пустоты и «ежи» из фибровых волокон. Контроль может выполняться точечный и сплошной. Точечный контроль выполняется в обязательном порядке на всех конструкциях. Сплошной контроль может выполняться для конструкций с сомнительными показателями прочности, дефектности (по результатам точечного контроля).

На третьем этапе используется метод прямого отрыва со скалыванием для определения критического коэффициента интенсивности напряжений и прочности фибробетона в конструкции [14]. Данный метод обязательно проводится на участках (конструкциях), где на предыдущих этапах испытаний были выявлены дефекты, снижение прочности и др.

Таблица 1. – Методика контроля качества фибробетона в конструкции

№	Наименование метода исследования	Получаемый результат
1 этап	Комбинированный (комплексный) метод	Прочность бетонной матрицы
2 этап	Метод ультразвуковой томографии	Толщина конструкции; наличие пустот, «ежей»; анализ прилегающего основания
3 этап	Прямой отрыв со скалыванием	Критический коэффициент интенсивности напряжений фибробетона; прочность фибробетона

**Описание объекта исследования.** С целью апробации предложенной методики, были проведены исследования фибробетонного промышленного пола в производственном цеху (рисунок 1). Цех представляет собой промышленное здание с железобетонным каркасом, покрытием из железобетонных ребристых плит и ограждением из сэндвич-панелей. Размеры производственного цеха 18×72 м в осях.

Конструкция пола состоит из песчаной подготовки, выравнивающего бетонного слоя, арматурного каркаса (только в наиболее нагруженных участках), фибробетонного слоя.

Фибра из листовой стали (ФЛА-0,9-50) представляет собой стальную полосу, имеющую на концах анкеры в виде сегментов окружности, радиусно сопряженных с прямыми участками полосы. Торцы полосы развернуты относительно друг друга на произвольный угол (ТУ ВУ 190345927.006-2018). Фибровые волокна вручную добавлялись в бетонную смесь непосредственно во вращающийся барабан автобетоносмесителя.

Характеристики поставляемой бетонной смеси на объект строительства: условное обозначение – БСГТ ПЗ С25/30 St-1 F200 W6 СТБ 1035-96; наибольшая крупность заполнителя – 10–20 мм; пластифицирующая добавка Реламикс ПК – 0,5%.



*a* – фибробетонная смесь при укладке; *б* – внешний вид стыка фибробетонного слоя пола;  
*в* – фибра из листовой стали анкерная (ФЛА-0,9-50)

Рисунок 1. – Объект исследования

Работы по устройству пола выполнялись по захваткам. Укладка смеси производилась непосредственно из автобетоносмесителя с последующим выравниванием при помощи виброрейки. Поверхность пола после затвердевания шлифовалась. Потом производилась нарезка деформационных швов с последующей герметизацией шва (рисунок 2).

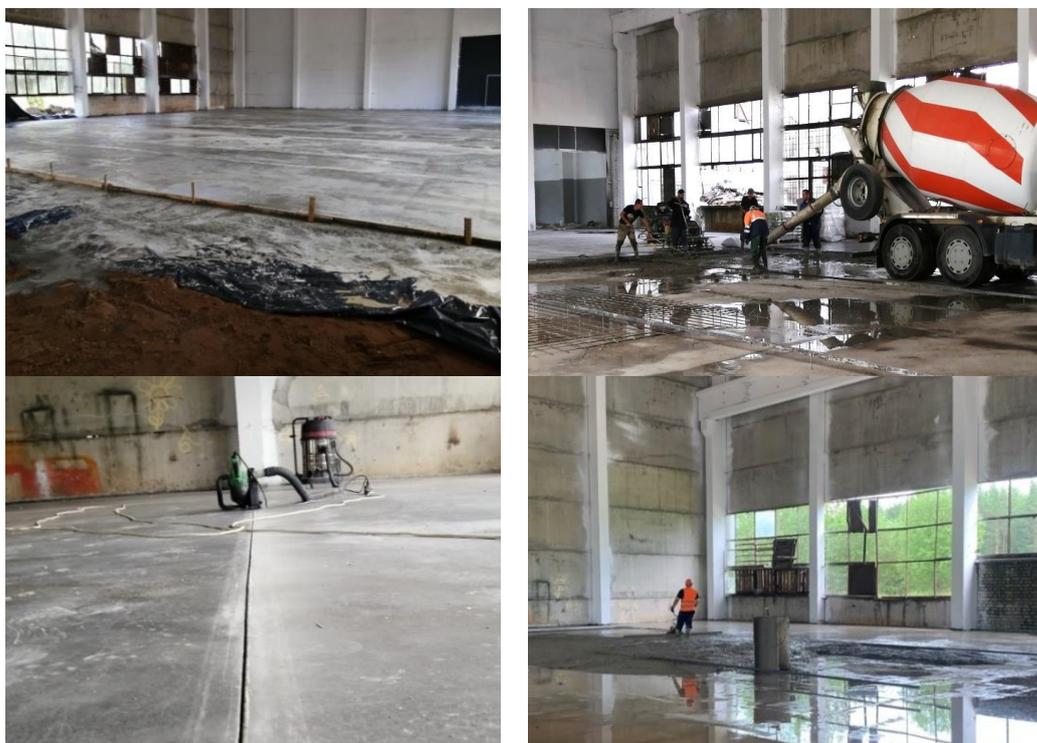


Рисунок 2. – Устройство фибробетонного пола

**Метод упругого отскока.** Для испытаний методом упругого отскока (СТБ 2264 и ГОСТ 22690) использовался прибор Молоток Шмидта (SilverSchmidt Proceq). Испытания проводились в два этапа. На первом этапе в лабораторных условиях фиксировались значения прибора на образцах-кубах  $100 \times 100 \times 100$  мм, зажатых плитами прессы под нагрузкой 30 кН (ГОСТ 22690). По полученным результатам расчетным путем выведено уравнение зависимости косвенных показателей от значений прочности на сжатие. На втором этапе в производственных условиях проводились испытания бетона в конструкции пола. Вся площадь пола была разбита на 48 контролируемых участков (секций) (рисунок 3).



в

Д	4	5	12	13	20	21	28	29	36	37	44	45	
Г	3	6	11	14	19	22	27	30	35	38	43	46	
В	2	7	10	15	18	23	26	31	34	39	42	47	
Б	1	8	9	16	17	24	25	32	33	40	41	48	
А	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13

а – испытания методом упругого отскока; б – УЗ; в – схема пола цеха, разбитая на секции

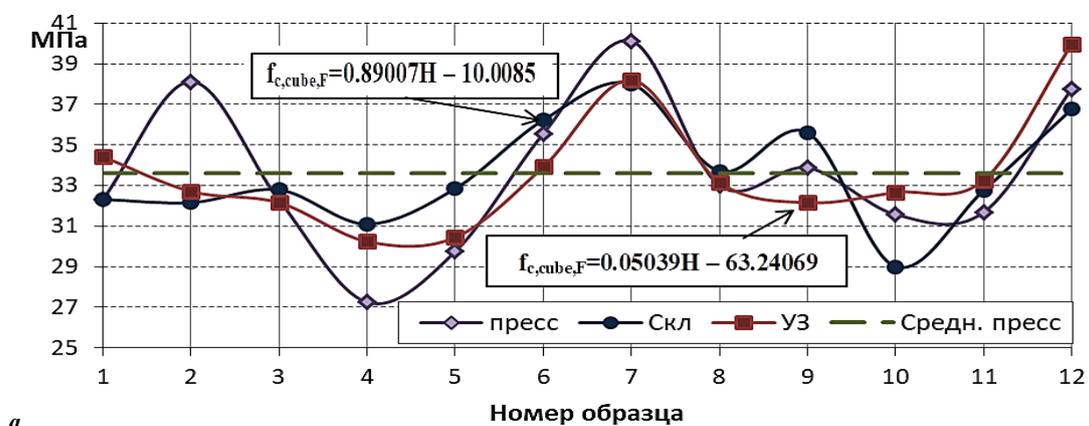
Рисунок 3. – Проведение испытаний

**Ультразвуковой импульсный метод.** Испытания ультразвуковым импульсным методом проводились согласно ГОСТ 17624. Сначала ультразвуковые испытания проводились на кубах 100×100×100 мм в лабораторных условиях прибором Пульсар 2.2. Потом ультразвуковым импульсным методом испытывали фибробетонный промышленный пол в производственном цеху в г. Сморгонь.

**Комбинированный (комплексный) метод.** Комбинированный метод оценки прочности фибробетона в конструкции промышленного пола заключается в проведении многопараметрового контроля, объединяющего оценки прочности метода упругого отскока и ультразвуковой метод по формуле (рисунок 4)

$$f_{is,1} = \frac{f_{is,1} + \theta f_{is,2}}{1 + \theta}$$

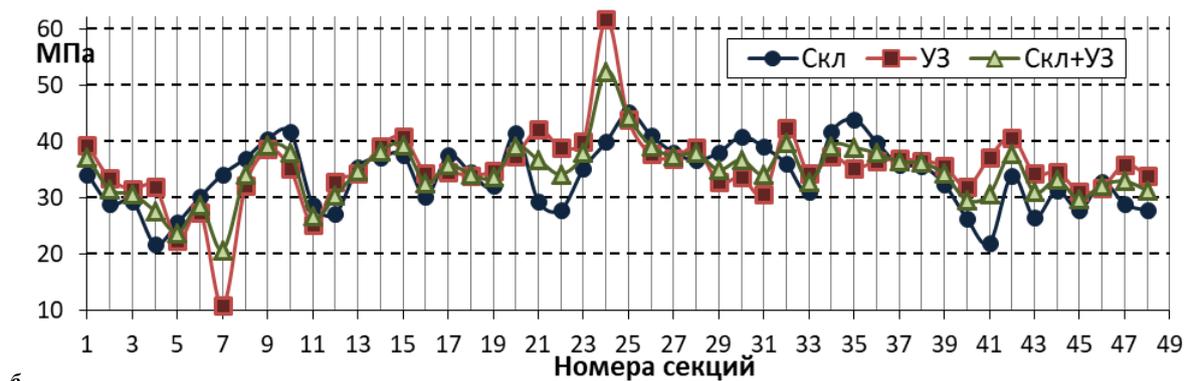
где  $f_{is,1}$  и  $f_{is,2}$  – оценки прочности бетона конструкции методами упругого отскока и ультразвука;  $\theta$  – относительный коэффициент влияния.



а

а – результаты испытаний образцов методами упругого отскока и УЗ

Рисунок 4. – Результаты испытаний (начало)



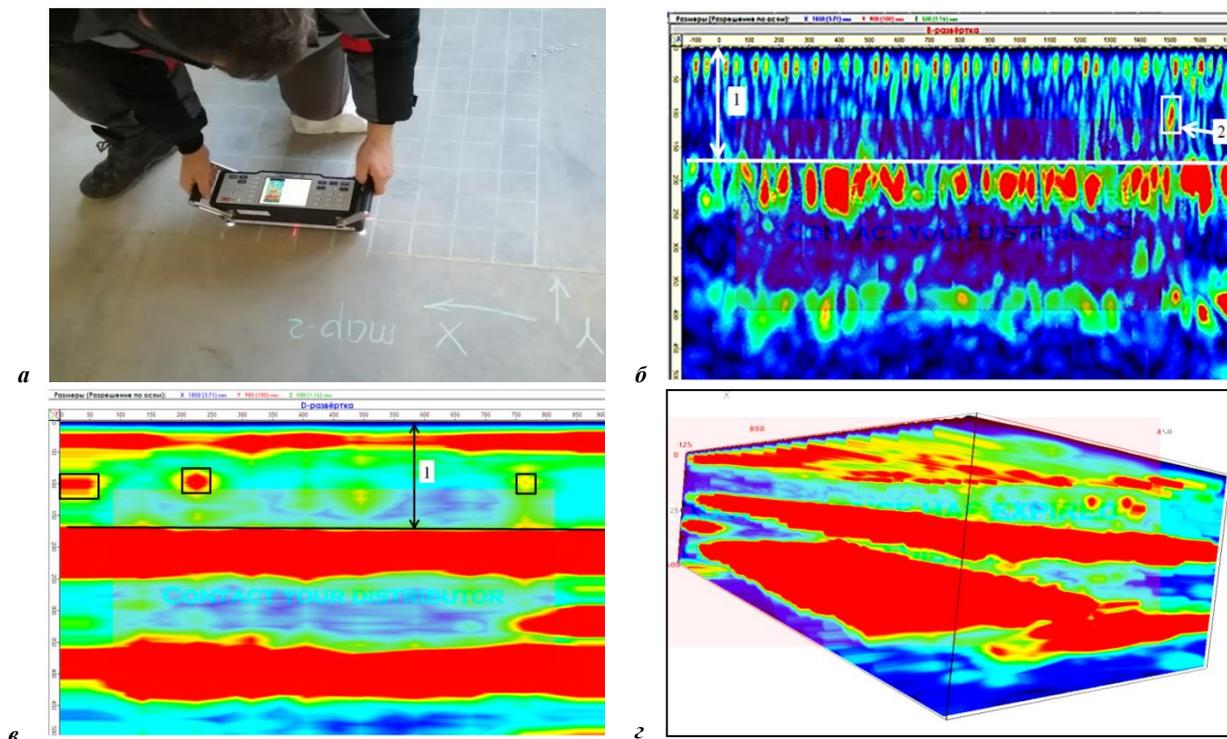
б

б – значения прочности в секциях фибробетонного пола, полученные методом упругого отскока (склерометр), ультразвуковым методом и их комбинированием

Рисунок 4. – Результаты испытаний (окончание)

Согласно полученным результатам неразрушающего контроля прочности фибробетона в конструкции промышленного пола, прочность на сжатие составляет 34,5 МПа, что больше гарантированной прочности (32 МПа) и меньше требуемой (38,4 МПа) для класса бетона С25/30.

**Ультразвуковая томография.** Ультразвуковая томография производилась при помощи ультразвукового низкочастотного томографа А1040 MIRA. Испытания проводились непосредственно на объекте исследования – готовая конструкция промышленного фибробетонного пола в проектном возрасте (рисунок 5, а). На первом этапе точно просканированы участки конструкции с получением В-сканов. На втором этапе выполнено полное сканирование участка пола длиной 1,6 м и шириной 1 м в режиме КАРТА (рисунок 5, б–г).



а – испытание ультразвуковым томографом А1040 MIRA; б – В-развертка (оси XZ); в – В-развертка (оси YZ); г – 3D-модель

Рисунок 5. – Томограммы полученной карты участка пола

Согласно полученным результатам исследования методом ультразвуковой томографии, толщина фибробетонного слоя конструкции пола составляет 160–162 мм (на рисунках 5, б, в указано под номером 1). В целом конструкция представляет сплошной монолитный объем дефектов. В нижней трети фибробетонного слоя при сплошном сканировании выявлены отражения сигнала (на рисунке 5, б обозначено номером 2), которые могут быть вызваны наличием в этих местах скопления фибровых волокон, воздух в которых отражает ультразвуковой сигнал.

**Заключение.** Результаты исследований позволяют оценить качество полученной фибробетонной конструкции в производственных условиях. Использование неразрушающих методов позволяет проводить неограниченное количество испытаний и получать объективное состояние исследуемой конструкции. Комбинирование неразрушающих методов позволяет получить дополняющие друг друга показатели.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Полонина, Е.Н. Физико-механические характеристики нанобетона / Е.Н. Полонина, С.Н. Леонович, Е.А. Коледа // Вестн. Инженерной шк. Дальневосточного федерального ун-та. – 2018. – № 4 (37). – С. 100–111. DOI: 10.5281/zenodo.2008672.
2. Пухаренко, Ю.В. О вязкости разрушения фибробетона / Ю.В. Пухаренко, В.Ю. Голубев // Вестн. гражданских инженеров. – 2008. – № 3 (16). – С. 80–83.
3. Fracture modeling of fiber reinforced concrete in a multiscale approach / M. Congro [et al.] // Composites. Part B, Engineering. – 2019. – Vol. 174. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.106958.
4. Influence of the Nanostructured-Carbon-Based Plasticizing Admixture in a Self-Compacting Concrete Mix on Its Technological Properties / S.A. Zhdanok [et al.] // J. of Engineering Physics and Thermophysics. – 2019. – Vol. 92, iss. 2. – P. 376–382. DOI: 10.1007/s10891-019-01941-7.
5. Tensile Strength of Nanofibrous Concrete / E.A. Sadovskaya [et al.] // J. of Engineering Physics and Thermophysics. – 2020. – Vol. 93, № 4. – P. 1015–1019. DOI: 10.1007/s10891-020-02202-8.
6. Cement-Based Materials Modified with Nanoscale Additives / E.N. Polonina [et al.] // Science and Technique. – 2021. – Vol. 20, № 3. – P. 189–194. DOI: 10.21122/2227-1031-2021-20-3-189-194.
7. Коледа, Е.А. Характеристики трещиностойкости фибробетона как определяющий фактор качества / Е.А. Коледа, С.Н. Леонович // Технология строительства и реконструкции : сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф. / Белорус. нац. техн. ун-т ; Нац. акад. наук Беларуси ; под ред. Б.М. Хрусталева, С.Н. Леоновича. – Минск : Белорус. нац. техн. ун-т, 2017. – С. 282–287.
8. Коледа, Е.А. Результаты испытаний нанофибробетона на растяжение с комплексным фибровым армированием / Е.А. Коледа, С.Н. Леонович, С.А. Жданок // Вестн. Поволжского гос. технол. ун-та. Сер. Материалы. Конструкции. Технологии. – 2018. – № 2. – С. 16–23.
9. Коледа, Е.А. Неразрушающий контроль качества фибробетонных конструкций как компонент системы мониторинга рисков при эксплуатации производственного объекта / Е.А. Коледа, С.Н. Леонович // Системные технологии. – 2016. – № 19. – С. 85–95.
10. Снежков, Д.Ю. Мультиволновой ультразвуковой контроль бетона / Д.Ю. Снежков, С.Н. Леонович // Наука и техника. – 2017. – Т. 16, № 4. – С. 289–297. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-4-289-297.
11. Снежков, Д.Ю. Повышение достоверности контроля прочности бетона неразрушающими методами на основе их комбинирования / Д.Ю. Снежков, С.Н. Леонович // Промышленное и гражданское строительство. – 2018. – № 1. – С. 25–32.
12. Шевалдыкин, В.Г. Ультразвуковые низкочастотные пьезопреобразователи с сухим точечным контактом и их применение для неразрушающего контроля / В.Г. Шевалдыкин, А.А. Самокрутов, В.Н. Козлов // Контроль. Диагностика. – 2003. – № 2. – С. 30–39.
13. Козлов, В.Н. Ультразвуковая дефектоскопия бетона эхо-методом: состояние и перспективы / В.Н. Козлов, А.А. Самокрутов, В.Г. Шевалдыкин // В мире неразрушающего контроля. – 2002. – № 2 (16). – С. 6–10.
14. Леонович, С.Н. Способ контроля качества сталефибробетона по коэффициенту интенсивности напряжений при нормальном отрыве / С.Н. Леонович // Поведение бетонов и железобетонных конструкций при наличии нагрузок и тепловлажностных воздействий различной длительности : электрон. сб. науч. тр. междунар. науч.-техн. конф. / Редкол.: Н.М. Зайченко [и др.]. – Макеевка : ДОННАСА, 2020. – С. 47–52.

## REFERENCES

1. Polonina, E.N., Leonovich, S.N. & Koleda, E.A. (2018). Fiziko-mekhanicheskie kharakteristiki nanobetona [Physical and mechanical properties of nano concrete]. *Vestn. Inzhenernoi shk. Dal'nevostochnogo federal'nogo un-ta [FEFU: School of Engineering Bulletin]*, (4), 100–111. (In Russ.). DOI: 10.5281/zenodo.2008672.
2. Pukharenko, Yu.V. & Golubev, V.Yu. (2008). O vyazkosti razrusheniya fibrobetona. *Vestn. grazhdanskikh inzhenerov [Bulletin of Civil Engineers]*, (3), 80–83. (In Russ.).
3. Congro, M., Sanchez, C.M., Roehl, D. & Marangon, E. (2019). Fracture modeling of fiber reinforced concrete in a multiscale approach. *Composites. Part B, Engineering*, 174. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.106958.
4. Zhdanok, S.A., Polonina, E.N., Leonovich, S.N., Khroustalev, B.M. & Koleda, E.A. (2019). Influence of the Nanostructured-Carbon-Based Plasticizing Admixture in a Self-Compacting Concrete Mix on Its Technological Properties. *J. of Engineering Physics and Thermophysics*, 92 (2), 376–382. DOI: 10.1007/s10891-019-01941-7.
5. Sadovskaya, E.A., Polonina, E.N., Leonovich, S.N. & Zhdanok, S.A. (2020). Tensile Strength of Nanofibrous Concrete. *J. of Engineering Physics and Thermophysics*, 93 (4), 1015–1019. DOI: 10.1007/s10891-020-02202-8.
6. Polonina, E.N., Leonovich, S.N., Khroustalev, B.M., Sadovskaya, E.A. & Budrevich, N.A. (2021). Cement-Based Materials Modified with Nanoscale Additives. *Science and Technique*, 20 (3), 189–194. DOI: 10.21122/2227-1031-2021-20-3-189-194.
7. Koleda, E.A. & Leonovich, S.N. (2017). Kharakteristiki treshchinostoikosti fibrobetona kak opredelyayushchii faktor kachestva. In B.M. Khroustalev (Eds.) & S.N. Leonovich (Eds.) *Tekhnologiya stroitel'stva i rekonstruktsii: sb. dokl. Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* (282–287). Minsk: Belorus. nats. tekhn. un-t. (In Russ.).
8. Koleda, E.A., Leonovich, S.N. & Zhdanok, S.A. (2018). Rezul'taty ispytaniy nanofibrobetona na rastyazhenie s kompleksnym fibrovym armirovaniem [Results of tension testing of nanofiber concrete with integrated fiber reinforcement]. *Vestn. Povolzhskogo gos. tekhnol. un-ta. Ser. Materialy. Konstruktsii. Tekhnologii [Vestnik of Volga State University of Technology. Ser. Materials. Constructions. Technologies]*, (2), 16–23. (In Russ., abstr. in Engl.).
9. Koleda, E.A. & Leonovich, S.N. (2016). Nerazrushayushchii kontrol' kachestva fibrobetonnykh konstruktsii kak komponent sistemy monitoringa riskov pri ekspluatatsii proizvodstvennogo ob"ekta [Non-destructive quality control of fiber-reinforced concrete structures as a component of the risk monitoring system during the operation of a production facility]. *Sistemnye tekhnologii*, (19), 85–95. (In Russ., abstr. in Engl.).

10. Snezhkov, D.Yu. & Leonovich, S.N. (2017). Mul'tivolnovoi ul'trazvukovoi kontrol' betona [Multi-Wave Ultrasonic Control of Concrete]. *Nauka i tekhnika [Science and Technique]*, 16 (4), 289–297. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-4-289-297. (In Russ., abstr. in Engl.).
11. Snezhkov, D.Yu. & Leonovich, S.N. (2018). Povyshenie dostovernosti kontrolya prochnosti betona nerazrushayushchimi metodami na osnove ikh kombinirovaniya [Improving Reliability of Testing Concrete Strength by Non-Destructive Methods on the Basis of Their Combination]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and Civil Engineering]*, (1), 25–32. (In Russ., abstr. in Engl.).
12. Shevaldykin, V.G., Samokrutov, A.A. & Kozlov, V.N. (2003). Ul'trazvukovye nizkochastotnye p'ezopreobrazovateli s sukhim tochechnym kontaktom i ikh primeneniye dlya nerazrushayushchego kontrolya. *Kontrol'. Diagnostika [Testing. Diagnostics]*, (2), 30–39. (In Russ.).
13. Kozlov, V.N., Samokrutov, A.A. & Shevaldykin, V.G. (2002). Ul'trazvukovaya defektoskopiya betona ekho-metodom: sostoyanie i perspektivy. *V mire nerazrushayushchego kontrolya*, (2), 6–10. (In Russ.).
14. Leonovich, S.N. (2020). Sposob kontrolya kachestva stalefibrobetona po koeffitsientu intensivnosti napryazhenii pri normal'nom otrывe. In N.M. Zaichenko (Eds.) [et al.] *Povedeniye betonov i zhelezobetonnykh konstruksii pri nalichii nagruzok i teplovla-zhnostnykh vozdeistvii razlichnoi dlitel'nosti: elektron. sb. nauch. tr. mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* (47–52). Makeevka: DON-NASA. (In Russ.).

Поступила 05.04.2022

## PRACTICAL TESTING OF A MULTIPARAMETER METHOD FOR ASSESSING THE QUALITY OF FIBER CONCRETE ON A CONSTRUCTION SITE

*E. SADOVSKAYA, S. LEONOVICH, N. BUDREVICH*

*This article presents the results of the practical application of a multi-parameter method for assessing the quality of fiber-reinforced concrete at a construction site. A monolithic fiber-reinforced concrete industrial floor in the production workshop is being investigated. Non-destructive testing methods are used: elastic rebound, ultrasonic pulse, ultrasonic tomography. As a result of the tests, the values of compressive strength, the thickness of the structure under study (with one-sided access), and the homogeneity of the material (voids and fiber "hedgehogs") were obtained.*

**Keywords:** *fiber-reinforced concrete, compressive strength, non-destructive testing method, ultrasonic tomography, elastic rebound.*

УДК 666.973.2

DOI 10.52928/2070-1683-2022-31-8-38-45

## ФРАКЦИОННЫЙ СОСТАВ ИЗМЕЛЬЧЕННОЙ СОСНОВОЙ КОРЫ И ВИД ВЯЖУЩЕГО КОМПОНЕНТА КАК ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ ПЛИТ

канд. техн. наук, доц. А.А. БАКАТОВИЧ, канд. техн. наук, доц. Н.В. БАКАТОВИЧ  
(Полоцкий государственный университет)  
А.Н. ПЕНКРАТ  
(ООО «Витгорстрой», Витебск)

*Рассмотрена возможность получения тепловой изоляции на основе сосновой коры как структурообразующего материала. Исследован гранулометрический состав с определением процентного содержания фракций в зависимости от толщины сосновой коры. Определен коэффициент теплопроводности измельченной коры по фракциям для оптимизации размеров частиц структурообразующего материала теплоизоляционных плит. В качестве вяжущих компонентов применяли модифицированное жидкое стекло и канифоль. Введение канифоли в виде мелкодисперсного порошка позволило уменьшить коэффициент теплопроводности жестких плит на крупной фракции (5–8 мм) до 0,051 Вт/(м·°С) при плотности 304 кг/м<sup>3</sup>. Коэффициент теплопроводности составов на канифоли снизился на 10–13% по сравнению с образцами на жидком стекле.*

**Ключевые слова:** сосновая кора, канифоль, жидкое стекло, фракция коры, коэффициент теплопроводности, плотность, теплоизоляционная плита.

**Введение.** Древесная сосновая кора является массовым отходом деревообрабатывающего производства, не имеющим масштабного промышленного применения. Однако в последнее время наметилось стремление предприятий перейти к безотходным и малоотходным ресурсосберегающим технологиям, предусматривающим утилизацию сосновой коры [1].

В настоящее время кору используют в качестве удобрения, брикетов или гранул для твердотопливных отопительных котлов и для извлечения химических соединений. Но все же основная доля коры вывозится на свалки или сжигается, что приводит к крайне нежелательным последствиям (повышение пожарной опасности, загрязнение окружающей среды). Кроме того, вывоз коры, содержание отвалов, аренда территорий требуют материальных затрат [2].

Наиболее простой способ утилизации – использование коры в виде мульчи разных фракций в садоводстве и ландшафтном дизайне<sup>1</sup>. На примере мульчи можно отметить ряд положительных свойств сосновой коры. Сосновая кора, уложенная вокруг основания кустарников и деревьев, хорошо проявляет себя при засухе и при затяжных дождях, так как не пропускает излишнюю влагу в почву и, вместе с тем, препятствует интенсивному испарению из грунта. Благодаря высокой стойкости к загниванию кора может оставаться на поверхности почвы 2–3 года без каких-то видимых разрушений.

В строительной отрасли наибольшее количество исследований посвящено использованию сосновой коры в виде заполнителя для изготовления коробетона, как правило, на цементном вяжущем<sup>23</sup> [3]. Также известна технология получения материалов различного назначения на основе древесных отходов и термопластичных полимеров под названием WPC (Wood-Polymer-Composites) [4]. Аналогично данной технологии российскими исследователями из Сибирского государственного технического университета предлагается производить плиты из коры и вторичного полиэтилена [5].

Мировой опыт получения тепловой изоляции на основе коры различных пород деревьев указывает на перспективность таких исследований. Известно использование волокон коры масличной пальмы, коры пробкового дуба, эвкалипта, белой акации, тополя, лиственницы, ели в виде исходного сырья для теплоизоляционных материалов<sup>45</sup> [6–9]. Анализ литературных источников показал, что сосновая кора имеет крайне ограниченное применение в качестве тепловой изоляции, однако обладает значительным потенциалом в этом направлении.

Экологически чистый изоляционный материал на основе коры сосны получен в Северном (Арктическом) федеральном университете [10]. Прочность полученных образцов составила 0,46–0,51 МПа, а теплопроводность равна 0,124–0,204 Вт/(м·°С). В Поволжском государственном технологическом университете (г. Йошкар-Ола) разработана технология получения теплоизоляционного материала из сосновой коры фракцией 5–30 мм и древесной стружки [11].

Проведены исследования по изучению теплофизических и акустических характеристик коры сосны для использования в качестве засыпного теплозвукоизоляционного материала [12]. Исследования проводили на фракции коры 0,5–1,0 мм. После обработки частицами базальта насыпная плотность коры составила 313 кг/м<sup>3</sup>, коэффициент теплопроводности 0,0651 Вт/(м·°С), индекс изоляции 28,5 дБ.

<sup>1</sup> Mulching with Wood/Bark Chips, Grass Clipping and Rock. 2009. URL: <https://cmg.extension.colostate.edu/Gardennotes/245.pdf>.

<sup>2</sup> Арболитовая смесь : а. с. 1733423 СССР / А.М. Краснов, З.С. Скибицкая, А.А. Краснов. – Оpubл. 05.15.1992, Бюл. № 24.

<sup>3</sup> Скибицкая, З.С. Арболит на основе окорки древесины: коробетон. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01008106835>.

<sup>4</sup> Особенности утепления стен пробкой. URL: <https://vashdizajn.ru/steny/uteplenie-sten-iznutri-probkoi/>.

<sup>5</sup> Becerra, C.F., Montory, J.S, Vega-Lara, J., Norambuena-Contreras, J. A new biobased composite material using bark fibres eucalyptus. URL: [https://www.researchgate.net/publication/314240239\\_New\\_Biobased\\_composite\\_material\\_using\\_bark\\_fibres\\_Eucalyptus](https://www.researchgate.net/publication/314240239_New_Biobased_composite_material_using_bark_fibres_Eucalyptus).

Из приведенной информации следует, что потенциал сосновой коры как самостоятельного структурообразующего материала для тепловой изоляции исследован недостаточно и требует дополнительного изучения. Таким образом, целью приведенных в работе исследований являлось получение теплоизоляционных плит на основе измельченной фракционированной сосновой коры и экологически безопасных вяжущих материалов.

**Исходные материалы.** В исследованиях использовали в качестве структурообразующего материала измельченную кору сосны обыкновенной (лат. *Pinus sylvestris*), произрастающей по всей территории Республики Беларусь. Наибольший ареол распространения сосны обыкновенной расположен на севере Беларуси, где произрастают сосновые леса на больших территориях.

Доля коры в заготовленной древесине может достигать 8–15% в зависимости от возраста и породы [2]. По данным Министерства лесного хозяйства, приведенным в Статистическом сборнике Республики Беларусь<sup>6</sup> за 2018 год, заготовлено 28,59 млн м<sup>3</sup> ликвидной древесины. Следовательно, объемы полученной коры составили примерно 2,8–4,2 млн м<sup>3</sup>. Ежегодно в России производится около 30 млн м<sup>3</sup> древесной коры [13]. В европейских странах объемы производства коры также значительны. В одной только Венгрии производят 500–600 тыс. м<sup>3</sup> древесной коры [14]. Основными веществами, содержащимися в коре сосны, являются лигнин – 44%, целлюлоза – 16%, пентозаны – 7% и гексозаны – 6% [15].

Для получения фракционированного структурообразующего материала из коры использовали измельчитель типа Эликор-1. Лабораторные сита соответствующего размера ячейки использовали для дополнительного фракционирования и отсева пылеватых частиц.

При формовке экспериментальных теплоизоляционных плит в качестве вяжущего применяли натриевое жидкое стекло, произведенное на ОАО «Домановский производственно-торговый комбинат» (Беларусь) и отвечающее требованиям ГОСТ 13078.

В качестве модифицирующих добавок в жидкое стекло вводили известь и гипс. Гидратная известь II сорта без добавок производства ОАО «Забудова» (Беларусь) соответствует требованиям СТБ ЕН 459-1. Гипс, изготовленный на ОАО «Белгипс» (Беларусь), соответствует требованиям ГОСТ 125-79.

Также использовали канифоль из смолы сосны как вяжущий экологически безопасный компонент теплоизоляционных плит. Канифоль (лат. *colophonia resina*) – колофонская смола, представляет собой достаточно хрупкое аморфное вещество стекловидной структуры, имеющее характерный стеклянный блеск. Производится канифоль из живицы – смолянистого вещества, выделяемого хвойными деревьями при их механическом повреждении. Для изготовления образцов тепловой изоляции использовали сосновую канифоль марки А производства ООО «СДС-Группа» (Россия). Канифоль применяли в виде тонкодисперсного порошка. Предварительно канифоль измельчалась и просеивалась через сито № 0.315. В итоге получали светло-желтый порошок.

**Методики исследований.** Основные физические показатели теплоизоляционных плит – плотность, влажность – определяли в соответствии с ГОСТ 17177 «Материалы и изделия строительные теплоизоляционные. Методы испытаний». Коэффициент теплопроводности экспериментальных утеплителей измеряли согласно СТБ 1618 «Методы определения теплопроводности при стационарном тепловом режиме» на образцах-плитах размером 250×250×30 мм.

Первоначально определяли коэффициент теплопроводности фракционированной коры в насыпном состоянии без вяжущего компонента. Необходимое количество измельченной коры засыпали и равномерно распределяли в измерительном устройстве прибора ИТП-МГ4 для установления показателя теплопроводности.

Во второй серии образцов измельченную кору перемешивали с модифицированным жидким стеклом. Предварительно производили дозировку компонентов. В жидкое стекло вводили сначала известь и перемешивали до однородной консистенции, а затем добавляли гипс. Сырьевую смесь равномерно укладывали в форму и подпрессовывали. Образцы выдерживали в форме 4 часа при температуре 20±2 °С, а затем высушивали в течение 10 часов в сушильном шкафу при температуре 45–50 °С. После определяли среднюю плотность и теплопроводность плит.

В третьей серии измельченную кору перемешивали с порошком канифоли. Технология подготовки сырьевой массы и получения плит приведена в экспериментальной части работы.

**Результаты экспериментальных исследований.** Перед тем как приступить к разработке составов теплоизоляционных материалов, проведен комплекс исследований по определению основных параметров структурообразующего материала из коры сосны. Для исследований использовали кору с нижней и средней части стволов деревьев. За нижнюю принималась часть ствола от уровня земли на высоту 2 м. Средняя часть ствола располагается на высоте от 2 до 5 м от уровня земли. Крупные фрагменты коры с нижней части ствола состоят из 5 и более слоев, имеют толщину от 5 мм до 20 мм (рисунок 1). В средней части ствола формируется кора, состоящая из 1–3 слоев толщиной 1–4 мм (рисунок 2).

Так, для фракции 20 мм коэффициент теплопроводности составил 0,08 Вт/(м·°С) при плотности 191 кг/м<sup>3</sup>. С уменьшением размера частиц коры до 15 мм коэффициент теплопроводности практически не изменился и соответствовал 0,082 Вт/(м·°С), а плотность уменьшилась на 14 кг/м<sup>3</sup> до 177 кг/м<sup>3</sup>. Тенденция понижения коэффициента теплопроводности на 11% проявилась при использовании частиц коры размером 10 мм: показатель равен 0,073 Вт/(м·°С) при плотности 180 кг/м<sup>3</sup>.

Далее частицы крупной коры фракции 20 мм перерабатывали в измельчителе, используя сито с диаметром отверстий 8 мм. Из полученной пробы удаляли пылевидные и мельчайшие части коры путем отсева на сите с раз-

<sup>6</sup> URL: [https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/publications/izdania/index\\_14055/](https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/publications/izdania/index_14055/).

мером отверстий 2 мм. Затем частицы, прошедшие через сито с размером отверстий 2 мм, просеивали на сите с размером ячейки 1,25 мм. Таким образом, получали фракцию 1,25–2 мм и отсев из мельчайших и пылевидных частиц коры.



Рисунок 1. – Кора с нижней части ствола сосны



Рисунок 2. – Кора со средней части ствола сосны

Фракцию 2–8 мм также получали из коры середины ствола. Полученную измельченную кору фракционировали по выше приведенной методике. Необходимо отметить, что частицы фракции, полученные из коры нижней и средней части ствола, отличаются по внешнему виду и своей форме. Первые имеют форму, близкую к округлой или эллипсоидной. Вторые – плосковидной или чешуйчатой формы, что обусловлено толщиной исходной коры. Можно предположить, что установленные отличия частиц коры по форме могут повлиять на показатели плотности и теплопроводности. Для изучения данного предположения проведен ряд исследований, рассмотренных ниже.

Для фракции 2–8 мм из коры нижней части ствола коэффициент теплопроводности равен 0,053 Вт/(м·°C), а для аналогичной фракции со средней части ствола показатель выше на 15% и составил 0,061 Вт/(м·°C). Коэффициент теплопроводности отличается незначительно для фракции 1,25–2 мм и равен 0,061 Вт/(м·°C) и 0,064 Вт/(м·°C) соответственно.

Измельченную кору с размером частиц 2–8 мм разделяли на три фракции: крупную (размеры частиц 5–8 мм), среднюю (размеры частиц 3–5 мм) и мелкую (размеры частиц 2–3 мм). На рисунке 3 представлены фракции, полученные из крупных фрагментов коры нижней части ствола сосны.



Рисунок 3. – Крупная, средняя фракции коры (слева направо)

Исследования влияния формы частиц на насыпную плотность и теплопроводность измельченной фракционированной коры приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Насыпная плотность и коэффициент теплопроводности измельченной сосновой коры

Фракция коры	Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>		Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C)	
	нижняя часть ствола	средняя часть ствола	нижняя часть ствола	средняя часть ствола
Крупная, 5–8 мм	165	168	0,047	0,05
Средняя, 3–5 мм	165	170	0,05	0,056
Мелкая, 2–3 мм	171	176	0,053	0,062

Мелкая фракция (2–3 мм) показывает наибольшие коэффициенты теплопроводности, совпадающие с показателями общей фракции 2–8 мм. При этом коэффициент теплопроводности мелкой фракции из коры нижней части ствола меньше на 15% значения измельченной коры из средней части.

Показатели средних фракций также отличаются на 11% между собой. Коэффициент теплопроводности фракции из измельченных крупных фрагментов коры имеет меньший показатель и соответствует 0,05 Вт/(м·°С).

Наименьшую теплопроводность обеспечивают крупные фракции размером 5–8 мм. Фракция из нижней части ствола имеет наилучший коэффициент теплопроводности равный 0,047 Вт/(м·°С), что только на 6% ниже показателя измельченной коры со средней части ствола. Таким образом, можно говорить о незначительных отличиях полученных значений коэффициентов теплопроводности для крупных фракций.

Следует отметить, что коэффициент теплопроводности крупной фракции нижней части ствола меньше показателя мелкой фракции только на 11%. Для средней части ствола коэффициент теплопроводности между крупной и мелкой фракциями коры имеет большее отличие и составляет 19%. При этом плотность в насыпном состоянии разных фракций коры, как для нижней, так и для средней части ствола имеет несущественные отличия и изменяется в пределах 165–176 кг/м<sup>3</sup>.

После измельчения проводили гранулометрический анализ полученной полифракционной смеси отдельно для коры с нижней и средней части ствола. Полученные результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2. – Гранулометрический состав коры после измельчения

Исходная кора	Содержание фракции, %				
	5–8 мм	3–5 мм	2–3 мм	1,25–2 мм	пылевидный отсев
средняя часть ствола	8	24,4	16,4	19,3	32,4
нижняя часть ствола	13,4	30,5	18,6	18,2	18,8

По результатам гранулометрического анализа установлено, что при измельчении коры нижней части ствола существенно сокращается образование пылевидных частиц в 1,72 раза относительно массы пылевидного отсева коры со средней части ствола. Для фракции 1,25–2 мм содержание измельченной коры для проб из нижней и верхней части отличается незначительно. Существенные расхождения в сторону увеличения по процентному содержанию фракций в диапазоне 2–8 мм отмечаются для измельченной коры с нижней части ствола. Так, для фракции 2–3 мм прирост составляет 13% и содержание частиц соответствует 18,6%. Относительно количества частиц фракции 3–5 мм со средней части ствола получение измельченной коры с нижней части ствола увеличилось на 25%. Содержание крупной фракции коры нижней части ствола возросло в 1,67 раза и достигает 13,4%.

Полученные данные свидетельствуют о том, что предпочтительней измельчать крупные фрагменты коры, так как на выходе увеличивается на 27% доля фракций, обеспечивающих наилучшие теплотехнические показатели и значительно снижается количество пылевидных отсевов.

Основываясь на полученных значениях коэффициента теплопроводности для измельченной коры в насыпном состоянии (см. таблицу 1), дальнейшие исследования проводили на крупной и средней фракции. Для крупной фракции расход коры на плиту равен 470 г, для средней фракции – 420 г. Количество жидкого стекла по сухому веществу на образец принято 60–100 г. Содержание воды составляло 520–570 г на плиту.

При использовании жидкого стекла предварительно производили смачивание измельченной коры с помощью распылителя. По причине высокой открытой пористости частиц коры невозможно произвести равномерное распределение жидкого стекла по всей массе заполнителя. Вода, содержащаяся в жидком стекле, мгновенно впитывается в структуру частиц коры. Твердая фаза жидкого стекла остается на поверхности коры, быстро переходя из вязкой фазы в рыхлую с дальнейшим формированием твердой структуры, теряет склеивающее свойство и способность к равномерному покрытию поверхности всех частиц коры.

Предварительное смачивание водой коры существенно замедляет процесс поглощения воды из жидкого стекла пористой поверхностью частиц заполнителя. Также установлено, что количество необходимой воды для смачивания коры зависит от размера частиц заполнителя. Для изготовления образца-плиты из крупной фракции коры при смачивании расход воды сокращается на 50 г, что объясняется меньшей общей геометрической площадью поверхности крупных частиц по сравнению с показателем частиц средней фракции.

Для обеспечения плотной структуры плиты формовали под небольшим давлением 0,008–0,009 МПа на прессе. На формирование структуры и плотность образцов также оказывали влияние расход жидкого стекла и измельченной коры. Предварительные исследования по подбору расхода заполнителя показали, что для формирования плотной структуры плиты с минимальной пустотностью требуется на 12% (50 г) больше крупного заполнителя, чем для образцов на средней фракции измельченной коры.

Результаты исследований приведены в таблице 3. Наименьшим показателем теплопроводности равным 0,053 Вт/(м·°С) обладают плиты с крупной фракцией коры нижней части ствола и расходом жидкого стекла 60 г (состав 1). При исследовании влияния жидкого стекла на коэффициент теплопроводности теплоизоляционных плит установлено, что увеличение расхода вяжущего с 60 до 100 г влечет за собой повышение показателя на 15%.

Таблица 3. – Составы и свойства плит из измельченной коры на жидком стекле

№ состава	Масса образца, г	Фракция коры, мм	Расход на образец-плиту			Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C)	Состояние плиты
			сосновая кора, г	жидкое стекло, г	вода, г			
1	530	Крупная, 5–8 мм (нижняя часть ствола)	470	60	520	282,7	0,053	шелушение жесткая жесткая
2	550		470	80	520	293,3	0,057	
3	570		470	100	520	304,0	0,061	
4	480	Средняя, 3–5 мм (нижняя часть ствола)	420	60	570	256,0	0,056	слабая структура жесткая жесткая
5	500		420	80	570	266,7	0,059	
6	520		420	100	570	277,3	0,066	
7	530	Крупная, 5–8 мм (средняя часть ствола)	470	60	520	282,7	0,055	шелушение жесткая жесткая
8	550		470	80	520	293,3	0,058	
9	570		470	100	520	304,0	0,063	
10	480	Средняя, 3–5 мм (средняя часть ствола)	420	60	570	256,0	0,059	слабая структура жесткая жесткая
11	500		420	80	570	266,7	0,064	
12	520		420	100	570	277,3	0,068	

Максимальные значения коэффициента теплопроводности получены на заполнителе средней фракции из коры средней части ствола. В сравнении с составами 1–3 коэффициент теплопроводности плит на средней фракции (составы 10–12) возрастает в среднем на 11%.

В процессе подбора оптимальных составов учитывался не только коэффициент теплопроводности, но и состояние плит после сушки. После введения жидкого стекла в количестве 60 г на поверхности плит наблюдалось шелушение частиц заполнителя или фиксировалась слабосвязанная структура, не обеспечивающая жесткость и геометрию тепловой изоляции. Жесткие плиты без шелушения поверхности получены при расходе жидкого стекла в пределах 80–100 г на образец-плиту. С учетом обеспечения жесткости плит минимальный показатель коэффициента теплопроводности 0,057 Вт/(м·°C) и 0,058 Вт/(м·°C) обеспечивают плиты составов 2 и 8 на крупной фракции. Полученные значения коэффициентов теплопроводности ниже наименьших показателей средней фракции (составы 6 и 12) на 14–15%.

Следует отметить, что после интенсивного смачивания водой кора темнеет и после сушки плиты имеют темно-коричневый цвет (рисунок 4).

Для формовки плит на канифоли расход фракционированной коры принят согласно таблице 3. Порошок канифоли использовали в количестве 50–150 г на одну плиту.

При введении порошка канифоли существует проблема, связанная с его осыпанием на дно емкости при перемешивании с заполнителем. В работе<sup>7</sup> предложен «мокрый» способ введения порошка канифоли в виде водной суспензии. Разработанная «мокрая» технология предусматривает достаточно длительный по времени режим сушки в два этапа с изменением ее температуры.

По указанным причинам предлагается новая технология перемешивания вяжущего и заполнителя. Для предотвращения осыпания порошка с частиц коры на первом этапе вводилось не более 50 г канифоли. После перемешивания заполнитель распределяли тонким слоем на противне и помещали в сушильный шкаф при температуре 80 °C на 10 минут. Частицы канифоли подплавляются при такой температуре и заполняют открытые поры коры, одновременно формируя микрооболочку вокруг каждой частицы коры. Затем коре давали остыть и перемешивали со следующей порцией канифоли (не более 50 г), после чего помещали в сушильный шкаф. Количество циклов зависит от массы вводимого порошка. На последнем этапе, после обработки канифолью, заполнитель помещали в форму и подпрессовывали с помощью пресса при давлении 0,016–0,018 МПа. Крышку формы фиксировали и в таком виде форму помещали в сушильный шкаф, где выдерживали 1,5 часа при температуре 90 °C. При использовании канифоли получали плиты естественного коричневого цвета сосновой коры (рисунок 5). Результаты экспериментов приведены в таблице 4.

<sup>7</sup> Болтрушевич, Н.А. Изоляционные материалы, содержащие заполнитель на основе тростника и соломы : дис. ... магистра техн. наук : 70.80.01 / Н.А. Болтрушевич. – Полоцк, 2021. – 62 л.



Рисунок 4. – Плита из измельченной коры (фракция 5–8 мм, нижняя часть ствола) и жидкого стекла

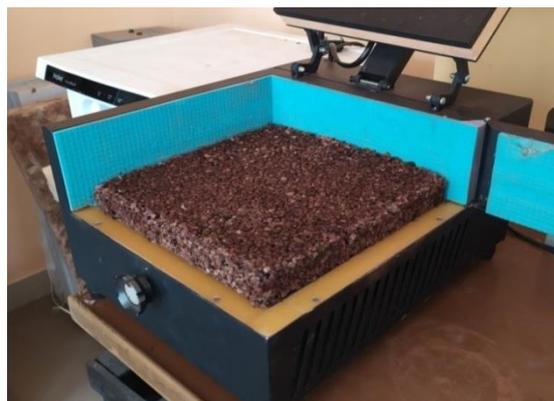


Рисунок 5. – Плита измельченной коры (фракция 5–8 мм нижней части ствола) и канифоли в приборе ИТП-МГ4

Таблица 4. – Составы и свойства теплоизоляционных плит на канифоли

№ состава	Фракция коры, мм	Расход на образец-плиту		Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	Состояние плиты
		сосновая кора, г	канифоль, г			
1	Крупная, 5–8 мм (нижняя часть ствола)	470	50	277,3	0,049	шелушение
2		470	100	304,0	0,051	жесткая
3		470	150	330,7	0,054	жесткая
4	Средняя, 3–5 мм (нижняя часть ствола)	420	50	250,7	0,051	шелушение
5		420	100	277,3	0,054	жесткая
6		420	150	304,7	0,055	жесткая
7	Крупная, 5–8 мм (средняя часть ствола)	470	50	277,3	0,051	шелушение
8		470	100	304,0	0,053	жесткая
9		470	150	330,7	0,056	жесткая
10	Средняя, 3–5 мм (средняя часть ствола)	420	50	250,7	0,053	шелушение
11		420	100	277,3	0,056	жесткая
12		420	150	304,7	0,059	жесткая

По значению коэффициента теплопроводности наименьший показатель получен на образце из крупной фракции и дозировке канифоли 50 г (состав 1). Однако при осмотре плиты выявлено поверхностное шелушение и осыпание частиц коры, что указывает на недостаточное количество вяжущего. Аналогичный недостаток проявлялся и на других составах с такой же дозировкой канифоли (составы 4, 7, 10). При увеличении дозировки порошка канифоли отмеченный недостаток отсутствовал, а образцы-плиты имели жесткость.

Таким образом, наименьший коэффициент теплопроводности равный 0,051 Вт/(м·°С) для жестких плит обеспечивает состав 2. Коэффициенты теплопроводности образцов на крупной фракции средней части ствола (составы 8, 9) незначительно отличаются от составов 2, 3.

Максимальное значение коэффициента теплопроводности равное 0,059 Вт/(м·°С) соответствует составу 12 на средней фракции со средней части ствола и превышает показатель состава 2 на 16%.

Необходимо отметить, что показатели экспериментальных плит с применением порошка канифоли имеют более низкие показатели по сравнению с образцами на жидком стекле (см. таблицу 3). Коэффициент теплопроводности составов на канифоли снизился на 10–13% по сравнению с образцами на жидком стекле. Значение наименьшего показателя состава 2 понизилось на 11%.

Полученные результаты объясняются значительно более низким коэффициентом теплопроводности канифоли по сравнению с жидким стеклом, что подтверждается данными исследований в работе<sup>8</sup>.

**Заключение.** В результате можно сделать следующие выводы.

1. После измельчения коры на частицы размером не более 8 мм по результатам гранулометрического анализа установлено, что для коры с нижней части ствола на фракцию 3–5 мм приходится максимальное количество частиц равное 30,5%. При этом содержание крупных частиц с нижней части ствола увеличивается в 1,67 раза по сравнению с аналогичной фракцией со средней части и составляет 13,4%. Также в 1,72 раза сокращается масса пылевидного отсева и достигает 18,8%. Таким образом, при использовании коры с нижней части ствола получается больший выход по массе рабочих фракций равный 62,5% для получения тепловой изоляции.

<sup>8</sup> См. сноску 7.

2. Эксперименты по определению коэффициента теплопроводности фракционированных частиц коры позволили установить, что кора с нижней части ствола обладает более низкой теплопроводностью по сравнению с показателями коры средней части ствола. На крупной и средней фракции коры достигаются минимальные показатели 0,047–0,05 Вт/(м·°C). Достаточно низкие коэффициенты теплопроводности указывают на возможность использовать кору средней и крупной фракции в качестве засыпной изоляции.

3. Использование модифицированного жидкого стекла в качестве вяжущего компонента обеспечило формовку жестких плит с коэффициентом теплопроводности 0,057–0,058 Вт/(м·°C) при плотности 293 кг/м<sup>3</sup>. Полученные показатели ниже минимальных значений теплопроводности плит из средней фракции на 14–15%.

4. Введение канифоли в виде мелкодисперсного порошка позволило снизить коэффициент теплопроводности жестких плит на крупной фракции до 0,051 Вт/(м·°C) при плотности 304 кг/м<sup>3</sup>. Максимальный коэффициент теплопроводности равен 0,059 Вт/(м·°C) для средней фракции частиц коры. Коэффициент теплопроводности составов на канифоли снизился на 10–13% по сравнению с образцами на жидком стекле.

5. Снижение коэффициента теплопроводности в составах с применением канифоли происходит благодаря разработанному технологическому решению по введению и премешиванию порошка вяжущего с фракционированной корой «сухим» способом, что также позволяет существенно сократить время изготовления плит и расход энергоносителей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Чемоданов, А.Н. Продукция комплексной переработки древесины и древесных материалов : учеб. пособие / А.Н. Чемоданов, Е.М. Царев, С.Е. Анисимов. – Йошкар-Ола : Марийский гос. техн. ун-т, 2008. – 444 с.
2. Тащюн, М.В. Современное состояние ЛПК России и пути его развития / М.В. Тащюн. – М. : ООО «РИАПресс», 2006. – С. 24.
3. Волынский, В. Переработка и использование древесной коры / В. Волынский // ЛесПромИнформ. – 2012. – № 2 (84). – С. 168–170.
4. Holz ist ein innovativer Werkstoff // НК: Holz- und Kunststoffverarb.: Internationale Fachzeitschrift fur Unternehmer und Führungskräfte. – 2006. – Vol. 41, iss. 7–8. – P. 22–26.
5. Руденко, Б.Д. Режим изготовления плит из коры и вторичного полиэтилена / Б.Д. Руденко, С.М. Плотников // Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2009. – № 24. – С. 146–149.
6. Romanovskiy, S. Effect of Modified Liquid Glass on Absorption Humidity and Thermal Conductivity of Flax Fiber Slabs / S. Romanovskiy, A. Bakatovich // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – № 660. DOI: 10.1088/1757-899X/660/1/012072.
7. Обромпальский, Р.Л. Теплоизоляционные композиты на основе волокон коры эвкалипта / Р.Л. Обромпальский, А.А. Бакатович // Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации : электрон. сб. ст. II междунар. науч. конф., Новополюцк, 28–29 нояб. 2019 г. / Полоц. гос. ун-т ; под ред. Л.М. Парфеновой. – Новополюцк : Полоц. гос. ун-т, 2020. – С. 405–410.
8. Веретенник, Д.Г. Использование древесной коры в народном хозяйстве / Д.Г. Веретенник. – М. : Лесная пром-сть. – 1976. – 117 с.
9. Исследования теплоизолирующей способности древесной коры / З. Пастори [и др.] // Лесотехнический журнал. Деревообработка. Химические технологии. – 2017. – № 1. – С. 157–161. DOI: 10.12737/25206.
10. Килошева, Н.В. Теплоизоляционный материал из коры сосны и ее экстракта / Н.В. Килошева, В.Е. Данилов, А.М. Айзенштадт // Строительные материалы. – 2016. – № 11. – С. 48–50.
11. Ахмедов, С.Р. Композиционный материал на основе коры и стружки / С.Р. Ахмедов, Е.В. Микрюкова // NovaUm. Технические науки. – 2018. – № 13. – С. 14–16.
12. Данилов, В.Е. Использование модифицированной древесной коры сосны обыкновенной в качестве засыпной теплозвукоизоляции / В.Е. Данилов, А.М. Айзенштадт // Лесной журнал. – 2019. – № 2. – С. 111–118. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.2.111.
13. Мелехов, В.И. Энергетический потенциал древесной коры в программе ресурсосбережения / В.И. Мелехов, Т.В. Тюрикова, Н.Г. Пономарева // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2015. – Т. 3, № 9–3 (20–3). – С. 106–110.
14. The Utilization of Tree Bark / Z. Pastory [et al.] // Bioresources. – 2016. – № 11 (3). – P. 7859–7888.
15. Цывин, М.М. Использование древесной коры / М.М. Цывин. – М. : Лесная пром-сть, 1973. – 96 с.

#### REFERENCES

1. Chemodanov, A.N., Tsarev, E.M. & Anisimov, S.E. (2008). *Produktsiya kompleksnoi pererabotki drevesiny i drevesnykh materialov*. Ioshkar-Ola: Mariiskii gos. tekhn. un-t. (In Russ.).
2. Tatsyun, M.V. (2006). *Sovremennoe sostoyanie LPK Rossii i puti ego razvitiya*. Moscow: ООО «РИАПресс». (In Russ.).
3. Volynskii, V. (2012). Pererabotka i ispol'zovanie drevesnoi kory. *LesPromInform*, (2), 168–170. (In Russ.).
4. Holz ist ein innovativer Werkstoff (2006). *НК: Holz- und Kunststoffverarb.: Internationale Fachzeitschrift fur Unternehmer und Führungskräfte*, 41 (7–8), 22–26.
5. Rudenko, B.D. & Plotnikov, S.M. (2009). Rezhim izgotovleniya plit iz kory i vtorichnogo polietilena. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, (24), 146–149. (In Russ.).
6. Romanovskiy, S. & Bakatovich, A. (2019). Effect of Modified Liquid Glass on Absorption Humidity and Thermal Conductivity of Flax Fiber Slabs. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, (660). DOI: 10.1088/1757-899X/660/1/012072.
7. Obrompal'skii, R.L. & Bakatovich, A.A. (2020). Teploizolyatsionnye kompozity na osnove volokon kory evkalipta [Thermal insulation composites based on eucalyptic bark fibers]. In L.M. Parfenova (Eds.) *Arkhitekturno-stroitel'nyi kompleks: problemy, perspektivy, innovatsii*: elektron. sb. st. II mezhduнар. nauch. konf., Novopolotsk, 28–29 noyab. 2019 g. (405–410). Novopolotsk: Polots. gos. un-t. (In Russ., abstr. in Engl.).

8. Veretennik, D.G. (1976). *Ispol'zovanie drevesnoi kory v narodnom khozyaistve*. Moscow: Lesnaya prom-st'. (In Russ.).
9. Pastori, Z., Mokhachine, I.R., Gorbacheva, G.A. & Sanaev, V.G. (2017). Issledovaniya teploizoliruyushchei sposobnosti drevesnoi kory [Investigation of thermal insulation capacity of tree bark]. *Lesotekhnicheskii zhurnal [Forestry Engineering Journal]*, (1), 157–161. DOI: 10.12737/25206. (In Russ., abstr. in Engl.).
10. Kilyusheva, N.V., Danilov, V.E. & Aizenshtadt, A.M. (2016). Teploizolyatsionnyi material iz kory sosny i ee ekstrakta [Heat Insulation Material Produced from Pine Bark and Its Extract]. *Stroitel'nye materialy [Construction Materials]*, (11), 48–50. (In Russ., abstr. in Engl.).
11. Akhmedov, S.R. & Mikryukova, E.V. (2018). Kompozitsionnyi material na osnove kory i struzhki. *NovaUm*, (13), 14–16. (In Russ.).
12. Danilov, V.E. & Ajzenshtadt, A.M. (2019). Ispol'zovanie modifitsirovannoi drevesnoi kory sosny obyknovЕННОI v kachestve zasypnoi teplozvukoizolyatsii [The Use of Modified Scots Pine Bark as Filling Material of Heat and Sound Insulation]. *Lesnoi zhurnal [Forestry Journal]*, (2), 111–118. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.2.111. (In Russ., abstr. in Engl.).
13. Melekhov, V.I., Tyurikova, T.V. & Ponomareva, N.G. (2015). Energeticheskii potentsial drevesnoi kory v programme resursosbere-zhenie [The energy potential of the wood bark in the program of resource-saving]. *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledo-vanii XXI veka: teoriya i praktika [Actual directions of scientific researches of the XXI century: theory and practice]*, 3 (9–3), 106–110. (In Russ., abstr. in Engl.).
14. Pastory, Z., Mohacsine, I.R., Gorbacheva, G.A. & Borcsok, Z. (2016). The Utilization of Tree Bark. *Bioresources*, (11), 7859–7888.
15. Tsyvin, M.M. (1973). *Ispol'zovanie drevesnoi kory*. Moscow: Lesnaya prom-st'. (In Russ.).

Поступила 25.05.2022

## THE FRACTIONAL COMPOSITION OF CRUSHED PINE BARK AND THE TYPE OF BINDER COMPONENT AS THE MAIN FACTORS AFFECTING THE THERMAL CONDUCTIVITY COEFFICIENT OF THERMAL INSULATION PLATES

*A. BAKATOVICH, N. BAKATOVICH, A. PENKRAT*

*The possibility of obtaining thermal insulation based on pine bark as a structure-forming material is considered. The granulometric composition was studied with the determination of the percentage of fractions depending on the thickness of the pine bark. The coefficient of thermal conductivity of crushed bark by fractions is determined to optimize the particle sizes of the structure-forming material of thermal insulation boards. Modified liquid glass and rosin were used as binding components. The introduction of rosin in the form of fine powder made it possible to reduce the thermal conductivity coefficient of rigid plates on a large fraction (5–8 mm) to 0.051 W / (m×°C) at a density of 304 kg/m<sup>3</sup>. The thermal conductivity coefficient of compositions on rosin decreased by 10–13% compared to samples on liquid glass.*

**Keywords:** pine bark, rosin, liquid glass, bark fraction, thermal conductivity coefficient, density, thermal insulation plate.

УДК 691.32:624.012.45/46

DOI 10.52928/2070-1683-2022-31-8-46-53

## ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МАКСИМАЛЬНОЙ ВЕЛИЧИНЫ КАРБОНИЗАЦИИ БЕТОНА

канд. техн. наук, доц. А.А. ВАСИЛЬЕВ

(Белорусский государственный университет транспорта, Гомель)

В статье обоснована необходимость исследования карбонизации бетона и оценки его максимальной карбонизируемости. Приведено основное уравнение прогнозирования изменения во времени по сечению бетона карбонатной составляющей цементно-песчаной фракции бетона. Предложено выражение для оценки предельной величины карбонизации бетона (ПВК). Проведено исследование и получены соответствующие зависимости ПВК от состава бетона, классов по прочности на сжатие  $C^8/10$ – $C^{50}/60$ , составов смесей, марок по удобоукладываемости П1...П5 и Ж1...Ж4. Выполнен анализ полученных значений ПВК.

**Ключевые слова:** бетон, карбонизация, карбонатная составляющая, предельная величина карбонизации бетона.

**Введение.** Поврежденность железобетонных элементов (ЖБЭ) и конструкций (ЖБК), эксплуатирующихся в различных воздушных средах, определяют, в первую очередь, коррозионные повреждения бетона и стальной арматуры. Авторские исследования [1] показывают, что в длительно эксплуатируемых (в различных воздушных средах) ЖБЭ и ЖБК доля коррозионных повреждений бетона и (или) стальной арматуры составляет до 90%. Кроме того, на основании многолетних исследований карбонизации бетона и ее влияния на изменение технического состояния ЖБЭ (ЖБК) показано, что карбонизация является основным видом коррозии бетона, снижающим его защитные свойства по отношению к стальной арматуре ЖБЭ и ЖБК, эксплуатирующихся в различных воздушных средах. Именно карбонизация бетона определяет остаточный ресурс подавляющего большинства зданий и сооружений [2; 3].

Карбонизацию бетона общепринято определяют и прогнозируют на основе 1-го закона Фика, используя индикаторный (фенолфталеиновый) тест (ФФТ). При этом считается, что она развивается линейно, по всему фронту, кроме того, карбонизация конечна во времени и в пространстве. Степень карбонизации бетона оценивается количеством поглощенного углекислого газа воздуха ( $CO_2$ )<sup>1234</sup> [4–9].

По результатам многолетних исследований (на основе исследования в лабораторных условиях кинетики взаимодействия растворов  $Ca(OH)_2$  различных концентраций с  $CO_2$  воздуха методами pH-метрии, карбометрии и микроскопического анализа, исследования кинетики испарения влаги, адсорбции и десорбции паров воды образцами бетона различных классов по прочности на сжатие методом измерения электросопротивления, исследования изменения карбонизации во времени, по сечению, как лабораторных образцов, так и образцов, отобранных из реально эксплуатируемых конструкций) показано, что карбонизация бетона не развивается линейно, по всему фронту, соответственно, она не подчиняется 1-му закону Фика. Ее развитие происходит по сложной экспоненциальной зависимости и ее необходимо исследовать, оценивать и прогнозировать в соответствии со 2-м законом Фика. Кроме того, предлагаемая оценка степени карбонизации по количеству поглощенного углекислого газа воздуха не позволяет корректно оценивать, а тем более прогнозировать развитие карбонизации бетона и ее влияния на состояние защитных свойств по отношению к стальной арматуре [10–15].

Поскольку при карбонизации бетона происходит образование карбонатов ( $CaCO_3$ ), ее предложено оценивать показателем КС (карбонатной составляющей), характеризующей количественное содержание карбонатов в цементно-песчаной фракции бетона в массовых процентах в исследуемой пробе. Данный показатель позволяет оценивать влияние роста карбонатов на изменение показателя pH (водородного показателя водной вытяжки цементного камня), являющегося, во-первых, основной количественной характеристикой перерождения цементного камня в карбонаты либо другие продукты химического взаимодействия под воздействием внешней среды и, во-вторых, универсальной характеристикой состояния бетона и его защитных свойств по отношению к стальной арматуре [1–3].

В прочностных и деформационных расчетах ЖБЭ (ЖБК) принимают (определяют) класс бетона по прочности на сжатие. При этом считается, что физико-механические, химические свойства, соответственно, карбонизируемость и долговечность бетонов различных составов (для одного класса бетона по прочности на сжатие) будут одинаковы.

<sup>1</sup> DuraCrete 7: General guidelines for durability design and redesign. The European Union – Brite EuRam III, Project No. BE95-1347, Probabilistic Performance-based Durability Design of Concrete Structures, Report No T7-01-1, 1999. – 250 p.

<sup>2</sup> Structural Concrete. Textbook on behavior, design and performance. URL: <https://www.fib-international.org/publications/fib-bulletins/structural-concrete-textbook,-volume-3-240-detail.html>.

<sup>3</sup> Бабицкий, В.В. Прогнозирование глубины карбонизации бетона / В.В. Бабицкий // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров в Республике Беларусь : материалы VI Междунар. науч.-техн. семинара. – Минск, 2000. – С. 3–6.

<sup>4</sup> Чернякевич, О.Ю. Расчет срока службы железобетонных конструкций в условиях коррозии карбонизации / О.Ю. Чернякевич, С.Н. Леонович // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров : материалы XVII Междунар. науч.-метод. семинара, Гродно, 27–28 мая 2010 г. – Гродно, 2010. – С. 369–375.

Карбонизация бетона развивается и продолжается все время эксплуатации ЖБЭ и ЖБК. Степень карбонизации бетона определяется, в первую очередь, эксплуатационными условиями (степенью их агрессивности по отношению к бетону и продолжительностью). Для различных составов бетона максимальные значения карбонатной составляющей будут отличаться. Они будут зависеть от количества использованного цемента и степени его гидратации ( $\alpha$ ) [16].

Для оценки карбонизируемости бетонов различных составов необходимо определять и сравнивать предельные величины карбонизации.

**Основная часть.** По результатам многолетних исследований лабораторных образцов бетонов различных классов по прочности на сжатие (составов) и образцов, отобранных из реально эксплуатируемых ЖБЭ (ЖБК) [1–3], получена в общем виде расчетно-экспериментальная зависимость изменения во времени карбонатной составляющей в цементно-песчаной фракции бетона

$$KC(l, t) = \alpha_1 + (\alpha_2 + \alpha_3 \sqrt{t}) e^{\left(14,2 - \left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}, \quad (1)$$

где  $\alpha_1$  – коэффициент, определяющий минимальное значение карбонатной составляющей, %;  
 $\alpha_2$  – коэффициент начальной карбонизации бетона, %;  
 $\alpha_3$  – коэффициент скорости карбонизации, %/лет<sup>1/2</sup>;  
 $t$  – величина прогнозного периода, лет;  
 14,2 – коэффициент, определяющий точку перегиба кривой;  
 $l$  – значение исследуемого сечения бетона, мм;  
 100 – максимальное значение глубины сечения бетона, мм;  
 5,05 – коэффициент, определяющий форму кривой, мм;  
 0,85 – коэффициент, определяющий форму кривой и координаты точек перегиба.

При этом, максимальная величина карбонатной составляющей для бетона определенного класса по прочности на сжатие (состава), %

$$KC(l, t)_{\max} = \alpha_4 \alpha, \quad (2)$$

где  $\alpha_4$  – предельная величина карбонизации бетона (ПВК), %;  
 $\alpha$  – степень гидратации цемента, доли ед.

Таким образом, максимальная величина карбонизации бетона будет определяться предельной величиной карбонизации (ПВК), а ее изменение во времени – изменением степени гидратации цемента.

Предельную карбонизируемость бетона предложено оценивать предельной величиной карбонизации (ПВК) [2]. ПВК характеризует содержание карбонатов в бетоне в массовых процентах при условии, что весь СаО цемента полностью перейдет в СаСО<sub>3</sub> ( $\alpha = 1$ ). Значения ПВК зависят от состава бетона и определяются по известной массе каждого компонента бетонной смеси.

Показатель ПВК предложено определять для цементно-песчаной фракции бетона по следующей методике<sup>5</sup>:

– рассчитывать массу СаО ( $m_{\text{СаО}}$ ) в цементе для приготовления 1 м<sup>3</sup> бетона:

$$m_{\text{СаО}} = m_{\text{ц}} \cdot k, \quad (3)$$

где  $m_{\text{ц}}$  – масса цемента, используемая для приготовления 1 м<sup>3</sup> бетона;  
 $k$  – коэффициент, определяющий процентное содержание СаО в цементе;  
 – определять массу СаСО<sub>3</sub> ( $m$ ) при карбонизации  $m_{\text{СаО}}$  в 1 м<sup>3</sup> бетона из пропорции

$$M_{\text{СаО}} - M_{\text{СаСО}_3},$$

$$m_{\text{СаО}} - m_{\text{СаСО}_3},$$

$$m_{\text{СаСО}_3} = \frac{m_{\text{СаО}} M_{\text{СаСО}_3}}{M_{\text{СаО}}}, \quad (4)$$

где  $M_{\text{СаО}}$  – молекулярная масса СаО (56 г/моль, или 56 кг);  
 $M_{\text{СаСО}_3}$  – молекулярная масса СаСО<sub>3</sub> (100 г/моль, или 100 кг);

$m_{\text{СаО}}$  – масса СаО в 1 м<sup>3</sup> бетона;

– рассчитывать массу цементно-песчаной фракции  $m_{\text{цп}}$ , кг, в 1 м<sup>3</sup> бетона с учетом привеса за счет полного превращения СаО в СаСО<sub>3</sub>:

$$m_{\text{цп}} = 1,15Ц + П + (m_{\text{СаСО}_3} - m_{\text{СаО}}), \quad (5)$$

где Ц – масса цемента, кг, в 1 м<sup>3</sup> бетона;  
 П – масса песка, кг, в 1 м<sup>3</sup> бетона;

<sup>5</sup> См. сноску 4.

– вычислять значение ПВК, %, из пропорции

$$m_{\text{цп}} - 100 \%,$$

$$m_{\text{CaCO}_3} - \text{ПВК},$$

$$\text{ПВК} = \frac{m_{\text{CaCO}_3}}{m_{\text{цп}}} \cdot 100. \quad (6)$$

Для оценки состава бетона на его максимальную карбонируемость определяли значения предельной величины карбонизации для различных классов бетона по прочности на сжатие ( $C^{8/10}$ – $C^{50/60}$ ) для бездобавочных составов смесей, марок по удобоукладываемости П1...П5 (ОК = 1...25 см) и Ж1...Ж4 (5...40 с) для каждой марки по удобоукладываемости.

Составы на каждый класс бетона по прочности на сжатие рассчитывали на основании многофакторного метода, предложенного профессором В.В. Бабицким. Для исследований принят портландцемент ПЦ 500 Д0 ОАО «Белорусский цементный завод» ( $k = 0,66$ ).

Для каждого класса бетона по прочности на сжатие и каждого значения отпускной прочности исследовалось по 65 составов бездобавочного бетона. Таким образом, было исследовано 3900 составов.

В общем виде выражение зависимости ПВК от количества использованного цемента (состава бетона):

$$\text{ПВК} = k_1 \text{Ц} + k_2,$$

где  $k_1$  – коэффициент, определяющий минимальное значение ПВК,  $\frac{\% \cdot \text{м}^3}{\text{кг}}$ ;

$k_2$  – коэффициент прироста значений ПВК, %.

Полученные зависимости изменения ПВК от состава для различных классов бетона по прочности на сжатие соответственно для смесей П1...П5 (ОК = 1...25 см) и Ж1...Ж4 (5...40 с) для отпускной прочности бетона 70% и результаты их анализа представлены в таблицах 1–3.

Таблица 1. – Результаты исследования ПВК для составов бетонных смесей марок по удобоукладываемости П1...П5

Класс бетона по прочности на сжатие	Зависимость ПВК = f(Ц)	Коэффициент детерминации, R <sup>2</sup>	Предел значений Ц, кг/м <sup>3</sup>	Предел значений ПВК, %	Разница значений ПВК, %	Среднее значение ПВК, %
C <sup>8/10</sup>	0,0883 Ц + 2,791	0,9953	133...181	13,57...17,63	4,060	16,42
C <sup>10/12,5</sup>	0,0781 Ц + 4,132	0,9960	165...224	16,76...21,47	4,710	20,07
C <sup>12/15</sup>	0,0747 Ц + 5,324	0,9962	195...265	19,60...24,94	5,340	23,33
C <sup>16/20</sup>	0,0683 Ц + 7,677	0,9973	252...343	24,60...30,92	6,320	28,98
C <sup>18/22,5</sup>	0,0662 Ц + 8,549	0,9985	279...385	26,77...33,90	7,130	31,58
C <sup>20/25</sup>	0,0644 Ц + 9,359	0,9987	306...428	28,79...36,76	7,970	34,14
C <sup>22/27,5</sup>	0,0619 Ц + 10,39	0,9987	331...471	30,61...39,40	8,790	36,56
C <sup>25/30</sup>	0,0592 Ц + 11,60	0,9987	357...513	32,40...41,81	9,410	38,84
C <sup>28/35</sup>	0,0536 Ц + 14,22	0,9988	418...599	36,29...46,19	9,900	43,03
C <sup>30/37</sup>	0,0509 Ц + 15,53	0,9981	441...632	37,64...47,55	9,910	46,42
C <sup>32/40</sup>	0,0468 Ц + 17,75	0,9971	476...682	39,58...49,46	9,880	46,38
C <sup>35/45</sup>	0,0410 Ц + 21,10	0,9964	533...763	42,49...52,22	9,730	49,21
C <sup>40/50</sup>	0,0364 Ц + 24,09	0,9959	589...842	45,02...54,53	9,510	51,62
C <sup>45/55</sup>	0,0326 Ц + 26,79	0,9958	644...919	47,27...56,55	9,280	53,70
C <sup>50/60</sup>	0,0293 Ц + 29,32	0,9956	697...995	49,25...58,28	9,030	55,52

Таблица 2. – Результаты исследования ПВК для составов бетонных смесей марок по удобоукладываемости Ж1...Ж4

Класс бетона по прочности на сжатие	Зависимость ПВК = f(Ц)	Коэффициент детерминации, R <sup>2</sup>	Предел значений Ц, кг/м <sup>3</sup>	Предел значений ПВК, %	Разница значений ПВК, %	Среднее значение ПВК, %
1	2	3	4	5	6	7
C <sup>8/10</sup>	0,1197 Ц – 2,345	0,9997	116...135	11,54...13,82	2,280	12,61
C <sup>10/12,5</sup>	0,1142 Ц – 2,067	0,9999	144...168	14,37...17,09	2,720	15,62
C <sup>12/15</sup>	0,1091 Ц – 1,660	0,9998	170...198	16,88...19,94	3,060	18,32
C <sup>16/20</sup>	0,0983 Ц – 0,178	0,9998	220...256	21,43...24,97	3,540	23,09
C <sup>18/22,5</sup>	0,0935 Ц + 0,683	0,9999	243...284	23,39...27,19	3,800	25,20

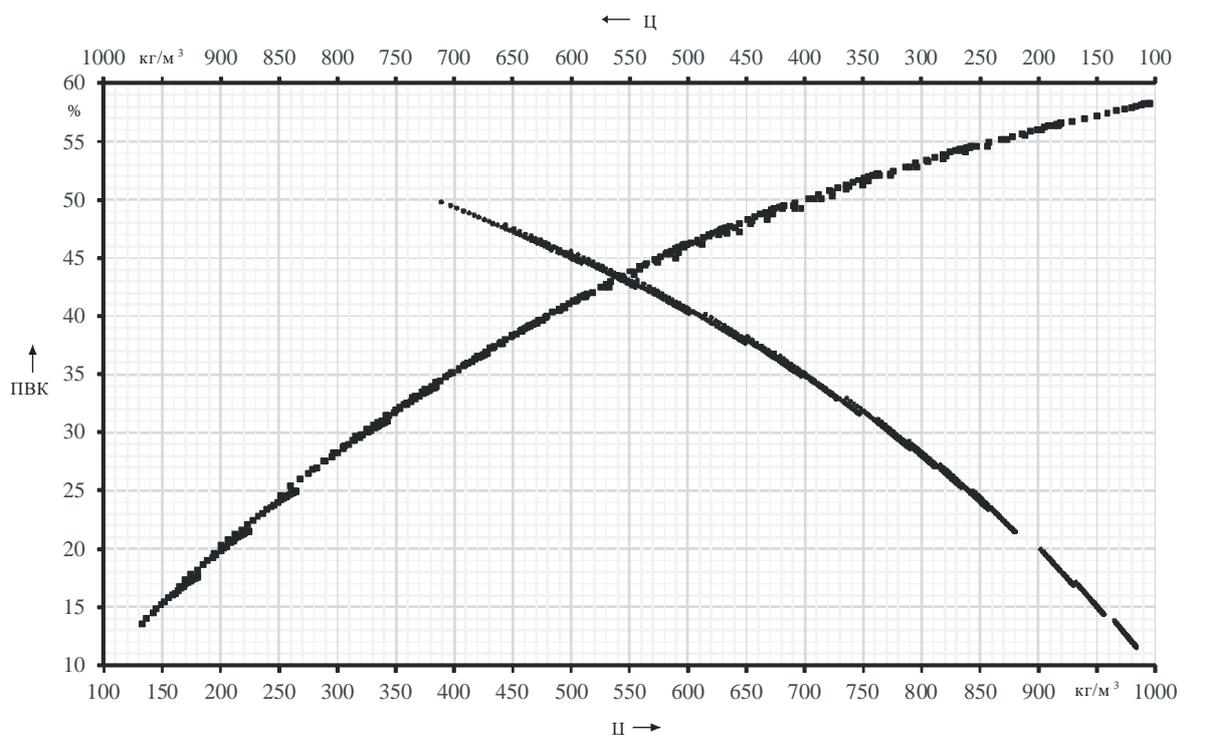
Окончание таблицы 2

1	2	3	4	5	6	7
C <sup>20</sup> / <sub>25</sub>	0,0886 Ц + 1,713	0,9999	266...311	25,27...29,23	3,960	27,15
C <sup>22</sup> / <sub>27,5</sub>	0,0845 Ц + 2,620	0,9998	289...337	27,03...31,07	4,040	28,94
C <sup>25</sup> / <sub>30</sub>	0,0806 Ц + 3,620	0,9998	310...364	28,60...32,94	4,340	30,62
C <sup>28</sup> / <sub>35</sub>	0,0724 Ц + 6,079	0,9997	353...426	31,59...36,84	5,250	34,10
C <sup>30</sup> / <sub>37</sub>	0,0695 Ц + 7,030	0,9997	373...449	32,90...37,18	4,280	35,42
C <sup>32</sup> / <sub>40</sub>	0,0650 Ц + 8,665	0,9996	403...485	34,81...40,13	5,320	37,37
C <sup>35</sup> / <sub>45</sub>	0,0587 Ц + 11,22	0,9997	451...543	37,66...43,04	5,380	40,27
C <sup>40</sup> / <sub>50</sub>	0,0531 Ц + 13,78	0,9994	499...600	40,21...45,56	5,350	42,82
C <sup>45</sup> / <sub>55</sub>	0,0484 Ц + 16,18	0,9993	545...656	42,47...47,80	5,330	45,06
C <sup>50</sup> / <sub>60</sub>	0,0441 Ц + 18,52	0,9993	591...711	44,53...49,78	5,250	47,08

Таблица 3. – Результаты исследования ПВК для составов бетонных смесей марок по удобоукладываемости П1...П5 и Ж1...Ж4

Класс бетона по прочности на сжатие	Среднее значение ПВК, % для марки по удобоукладываемости								
	П1	П2	П3	П4	П5	Ж1	Ж2	Ж3	Ж4
C <sup>8</sup> / <sub>10</sub>	14,24	15,84	16,93	17,45	17,64	13,53	12,89	12,26	11,75
C <sup>10</sup> / <sub>12,5</sub>	17,52	19,39	20,66	21,30	21,49	16,73	15,95	15,21	14,60
C <sup>12</sup> / <sub>15</sub>	20,47	22,54	23,98	24,70	24,95	19,55	18,68	17,86	17,17
C <sup>16</sup> / <sub>20</sub>	25,59	28,03	29,76	30,61	30,91	24,54	23,52	22,56	21,75
C <sup>18</sup> / <sub>22,5</sub>	27,83	30,41	32,34	33,44	33,87	26,71	25,66	24,66	23,78
C <sup>20</sup> / <sub>25</sub>	29,89	32,73	35,08	36,26	36,72	28,73	27,63	26,57	25,66
C <sup>22</sup> / <sub>27,5</sub>	31,81	35,16	37,61	38,85	39,35	30,57	29,43	28,35	27,42
C <sup>25</sup> / <sub>30</sub>	33,84	37,40	39,95	41,24	41,77	32,35	31,10	29,99	29,03
C <sup>28</sup> / <sub>35</sub>	37,77	41,50	44,18	45,55	46,13	36,21	34,76	33,33	32,11
C <sup>30</sup> / <sub>37</sub>	39,14	42,91	45,62	56,94	47,48	37,55	36,09	34,60	33,42
C <sup>32</sup> / <sub>40</sub>	41,12	44,92	47,60	48,88	49,40	39,51	38,05	36,59	35,34
C <sup>35</sup> / <sub>45</sub>	44,02	47,83	50,40	51,64	52,16	42,42	40,94	39,49	38,21
C <sup>40</sup> / <sub>50</sub>	46,55	50,29	52,78	54,00	54,48	44,96	43,49	42,05	40,76
C <sup>45</sup> / <sub>55</sub>	48,75	52,39	54,84	56,01	56,49	47,18	45,74	44,30	43,03
C <sup>50</sup> / <sub>60</sub>	50,70	54,26	56,63	57,77	58,22	49,17	47,74	46,33	45,09

На рисунке 1 приведены области значений ПВК для бездобавочных бетонов классов по прочности на сжатие C<sup>8</sup>/<sub>10</sub>–C<sup>50</sup>/<sub>60</sub>, смесей П1...П5 (ОК = 1...25 см) и Ж1...Ж4 (5...40 с) и отпускной прочности бетона на сжатие 70%.



■ – область значений ПВК (смеси П1...П5 (ОК = 1...25 см); ● – область значений ПВК (смеси Ж1...Ж4 (5...40 с))

Рисунок 1. – Область значений ПВК для бездобавочных бетонов классов по прочности на сжатие C<sup>8</sup>/<sub>10</sub>–C<sup>50</sup>/<sub>60</sub> (смеси П1...П5 (ОК = 1...25 см); Ж1...Ж4 (5...40 с)) и отпускной прочности на сжатие 70%

Анализ полученных данных показывает, что для одного класса бетона по прочности на сжатие для малопрочных бетонов ( $C^{8/10}-C^{16/20}$ ), бездобавочных составов с подвижностью смеси П1...П5, при отпускной прочности бетона на сжатие 70%, значения ПВК отличаются на 4...6%, с подвижностью смеси Ж1...Ж4 – на 2...4%; для средне- и высокопрочных соответственно на 8...10 и 4...5%.

Аналогично исследовались составы бетонов для отпускных прочностей 80, 90 и 100%. Они показывают, что с повышением отпускной прочности бетона на сжатие разница в ПВК для одного класса бетона по прочности на сжатие незначительно уменьшается. При повышении отпускной прочности бетона на сжатие на 10% средние значения ПВК растут (в среднем на 5%).

В общем виде выражение для прогнозирования значений ПВК, %:

$$\text{ПВК} = k_1 \text{Ц}^3 - k_2 \text{Ц}^2 + k_3 \text{Ц} - k_4, \quad (7)$$

где  $k_1-k_4$  – коэффициенты, аппроксимирующие полиномиальную кривую 3-ей степени;

$$k_1, \% \left( \frac{\text{М}^3}{\text{КГ}} \right)^3; \quad k_2, \% \left( \frac{\text{М}^3}{\text{КГ}} \right)^2; \quad k_3, \%; \quad k_4, \frac{\% \cdot \text{М}^3}{\text{КГ}};$$

Ц – количество цемента, кг/м<sup>3</sup>.

Полученные обобщенные зависимости показателя ПВК от состава для смесей П1...П5 (ОК = 1...25 см) и Ж1...Ж4 (5...40 с) для отпускных прочностей бетона на сжатие 70, 80, 90 и 100% приведены в таблице 4.

Таблица 4. – Результаты исследования ПВК для составов бетонных смесей марок по удобоукладываемости П1...П5 и Ж1...Ж4

Марка по удобоукладываемости	Отпускная прочность бетона, %	Зависимость ПВК = f(Ц)	Коэффициент детерминации, R <sup>2</sup>
П1...П5 (ОК = 1...25 см)	70	$3,0 \cdot 10^{-8} \text{Ц}^3 - 9,0 \cdot 10^{-5} \text{Ц}^2 + 0,1240 \text{Ц} - 1,585$	0,9997
	80	$3,3 \cdot 10^{-8} \text{Ц}^3 - 9,0 \cdot 10^{-5} \text{Ц}^2 + 0,1245 \text{Ц} - 1,667$	0,9997
	90	$2,8 \cdot 10^{-8} \text{Ц}^3 - 9,0 \cdot 10^{-5} \text{Ц}^2 + 0,1235 \text{Ц} - 1,567$	0,9997
	100	$2,2 \cdot 10^{-8} \text{Ц}^3 - 9,0 \cdot 10^{-5} \text{Ц}^2 + 0,1222 \text{Ц} - 1,394$	0,9996
Ж1...Ж4 (5-40 с)	70	$5,0 \cdot 10^{-8} \text{Ц}^3 - 1,0 \cdot 10^{-4} \text{Ц}^2 + 0,1317 \text{Ц} - 2,124$	0,9996
	80	$4,8 \cdot 10^{-8} \text{Ц}^3 - 1,0 \cdot 10^{-4} \text{Ц}^2 + 0,1307 \text{Ц} - 2,071$	0,9996
	90	$4,3 \cdot 10^{-8} \text{Ц}^3 - 1,0 \cdot 10^{-4} \text{Ц}^2 + 0,1290 \text{Ц} - 1,938$	0,9997
	100	$4,0 \cdot 10^{-8} \text{Ц}^3 - 1,0 \cdot 10^{-4} \text{Ц}^2 + 0,128 \text{Ц} - 1,825$	0,9997

Путем интерполяции значений коэффициентов  $k_1, k_3, k_4$  для граничных значений отпускной прочности бетона на сжатие получены полиномиальные зависимости 2-ой степени коэффициентов  $k_1, k_3, k_4$  для различных отпускных прочностей бетона на сжатие.

В общем виде зависимость коэффициентов  $k_1, k_3, k_4$  от отпускной прочности бетона на сжатие:

$$k_1(3)(4) = k_5(8)(11)R^2 + k_6(9)(12)R + k_7(10)(13), \quad (8)$$

где  $k_5-k_{13}$  – коэффициенты, аппроксимирующие полиномиальную кривую 2-ой степени;

R – отпускная прочность бетона на сжатие, МПа.

Значения коэффициентов  $k_5-k_{13}$  для составов бетонной смеси марок по удобоукладываемости П1...П5:

$$k_5 = -0,0028, \frac{\%}{\text{МПа}^2} \left( \frac{\text{М}^3}{\text{КГ}} \right)^3; \quad k_6 = 0,4325, \frac{\%}{\text{МПа}} \left( \frac{\text{М}^3}{\text{КГ}} \right)^3; \quad k_7 = -13,78, \% \left( \frac{\text{М}^3}{\text{КГ}} \right)^2;$$

$$k_8 = -5,0 \cdot 10^{-6}, \frac{\% \cdot \text{М}^3}{\text{МПа}^2 \cdot \text{КГ}}; \quad k_9 = 0,0007, \frac{\% \cdot \text{М}^3}{\text{МПа} \cdot \text{КГ}}; \quad k_{10} = 0,0970, \frac{\% \cdot \text{М}^3}{\text{КГ}}; \quad k_{11} = -6,0 \cdot 10^{-4}, \frac{\%}{\text{МПа}^2};$$

$$k_{12} = 0,1012, \frac{\%}{\text{МПа}}; \quad k_{13} = -2,381, \%$$

Значения коэффициентов  $k_5-k_{13}$  для составов бетонной смеси марок по удобоукладываемости Ж1...Ж4:

$$k_5 = -0,0003, \frac{\%}{\text{МПа}^2} \left( \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} \right)^3; \quad k_6 = 0,0075, \frac{\%}{\text{МПа}} \left( \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} \right)^3; \quad k_7 = 5,725, \% \left( \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} \right)^2;$$

$$k_8 = -8,0 \cdot 10^{-7}, \frac{\% \cdot \text{м}^3}{\text{МПа}^2 \cdot \text{кг}}; \quad k_9 = -9,0 \cdot 10^{-6}, \frac{\% \cdot \text{м}^3}{\text{МПа} \cdot \text{кг}}; \quad k_{10} = 0,1361, \frac{\% \cdot \text{м}^3}{\text{кг}}; \quad k_{11} = -2,0 \cdot 10^{-4}, \frac{\%}{\text{МПа}^2};$$

$$k_{12} = 0,0156, \frac{\%}{\text{МПа}}; \quad k_{13} = 2,782, \%.$$

Полученные зависимости для коэффициентов  $k_1, k_3$  и  $k_4$  составов бетонной смеси различных марок по удобоукладываемости приведены в таблицах 5 и 6.

Таблица 5. – Зависимости коэффициентов  $k_1, k_3$  и  $k_4$  для составов бетонной смеси марок по удобоукладываемости П1...П5

Коэффициент					
$k_1$		$k_3$		$k_4$	
Зависимость $f(R)$	$R^2$	Зависимость $f(R)$	$R^2$	Зависимость $f(R)$	$R^2$
$-0,0028R^2 + 0,4325R - 13,78$	0,9865	$-5,0 \cdot 10^{-6}R^2 + 0,0007R + 0,0970$	0,9754	$-6,0 \cdot 10^{-4}R^2 + 0,1012R - 2,381$	0,9847

Таблица 6. – Зависимости коэффициентов  $k_1, k_3$  и  $k_4$  для составов бетонной смеси марок по удобоукладываемости Ж1...Ж4

Коэффициент					
$k_1$		$k_3$		$k_4$	
Зависимость $f(R)$	$R^2$	Зависимость $f(R)$	$R^2$	Зависимость $f(R)$	$R^2$
$-0,0003R^2 + 0,0075R + 5,725$	0,9801	$-8,0 \cdot 10^{-7}R^2 - 9,0 \cdot 10^{-6}R + 0,1361$	0,9936	$-2,0 \cdot 10^{-4}R^2 + 0,0156R + 1,782$	0,9906

Таким образом, полученные по результатам анализа зависимости предельной величины карбонизации бездобавочного бетона от количества использованного цемента для различных отпускных прочностей бетона на сжатие:

- для составов бетонной смеси марок по удобоукладываемости П1...П5

$$\text{ПВК} = (-0,0003R^2 + 0,0075R + 5,725)\text{Ц}^3 + 1,0 \cdot 10^{-4}\text{Ц}^2 + (-8,0 \cdot 10^{-7}R^2 - 9,0 \cdot 10^{-6}R + 0,1361)\text{Ц} + 2,0 \cdot 10^{-4}R^2 - 0,0156R + 1,782; \quad (9)$$

- для составов бетонной смеси марок по удобоукладываемости Ж1...Ж4

$$\text{ПВК} = (-0,0003R^2 + 0,0075R + 5,725)\text{Ц}^3 - 1,0 \cdot 10^{-4}\text{Ц}^2 + (-8,0 \cdot 10^{-7}R^2 - 9,0 \cdot 10^{-6}R + 0,1361)\text{Ц} + 2,0 \cdot 10^{-4}R^2 - 0,0156R + 1,782. \quad (10)$$

Поскольку значения ПВК определяются из условия, что степень гидратации цемента составляет 100% ( $\alpha = 1$ ) (но даже при самых длительных сроках эксплуатации  $\alpha < 1$ ), максимальные величины карбонизации необходимо определять, учитывая степень гидратации цемента, изменяющейся во времени с учетом эксплуатационных условий.

Степень гидратации цемента и ее изменение во времени целесообразно определять по зависимостям, полученным профессором В.В. Бабицким.

Степень гидратации цемента в возрасте 28 суток твердения, %,

$$\alpha_{28}^{20} = 60X - 3\sqrt{(1,65X)^2} \cdot e^{1,65X}, \quad (11)$$

где  $X$  – относительное водосодержание цементного теста.  
Увеличение степени гидратации цемента с течением времени

$$\alpha = \alpha_{28}^{20} [1 + 0,21l \text{ г } \tau (X - 0,63)(\phi - 0,6)], \quad (12)$$

где  $\tau$  – время твердения цементного камня (бетона), месяцы;  
 $\phi$  – относительная влажность воздуха среды, доли единицы.

Для области обычной карбонизации целесообразно принимать  $\varphi = 0,65$  для условий общественных (промышленных, с неагрессивной или малоагрессивной эксплуатационной средой) зданий,  $\varphi = 0,70$  – для открытой атмосферы и  $\varphi = 0,75$  – для условий сельскохозяйственных помещений. Для области ускоренной карбонизации –  $\varphi = 0,80$  для условий общественных (промышленных, с неагрессивной или малоагрессивной эксплуатационной средой) зданий,  $\varphi = 0,85$  – для открытой атмосферы и  $\varphi = 0,95$  – для условий сельскохозяйственных помещений.

**Заключение.** Результаты исследований показывают, что для одного класса бетона по прочности на сжатие, для различных составов (в зависимости от количества использованного цемента), сразу после изготовления, карбонизируемость значительно отличается. Это необходимо учитывать при проектировании ЖБЭ и ЖБК. Нужно принимать составы бетона (с учетом рекомендуемых марок смесей по удобоукладываемости для конкретного изделия), используя как минимум средние значения ППК для каждой марки бетонной смеси по удобоукладываемости.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев, А.А. Прогнозирование коррозионной поврежденности железобетонных элементов для различных условий эксплуатации / А.А. Васильев // Вестн. БелГУТа: наука и транспорт. – 2019. – № 2 (39). – С. 37–39.
2. Васильев, А.А. Карбонизация и оценка поврежденности железобетонных конструкций : моногр. / А.А. Васильев. – Гомель : БелГУТ, 2012. – 263 с.
3. Васильев, А.А. Оценка и прогнозирование технического состояния железобетонных конструкций с учетом карбонизации бетона : моногр. / А.А. Васильев. – Гомель : БелГУТ, 2019. – 215 с.
4. Papadakis, V.G. Fundamental Modeling and Experimental Investigation of Concrete Carbonation / V.G. Papadakis, C.G. Vayenas, M.N. Fardis // *ACI Materials Journal*. – 1991. – Vol. 88, №. 4. – P. 363–373.
5. Prediction model for carbonation of concrete structure considering heat and moisture transfer / Y. Kishimoto [et al.] // *J. of Structural and Construction Engineering*. – 2005. – № 595. – P. 17–23.
6. Czarnecki, L. Methods of concrete carbonation testing / L. Czarnecki, P. Woyciechowski // *Construction and Building Materials*. – 2008. – № 426. – P. 5–7.
7. Статистические данные о глубине нейтрализации бетона в железобетонных конструкциях / В.Н. Левченко [и др.] // Вестн. Донбасской нац. акад. стр-ва и архитектуры. – 2009. – № 5 (79). – С. 40–42.
8. Бородай, Д.И. Прогноз сроков карбонизации бетона защитного слоя железобетонных элементов автодорожных мостов / Д.И. Бородай, А.А. Матюнин // Вестн. Донбасской нац. акад. стр-ва и архитектуры. – 2009. – № 1 (75). – С. 147–151.
9. Wang, X. A model for predicting the carbonation depth of concrete containing low-calcium fly ash / X. Wang, H. Lee // *Constr. and Build. Mater.* – 2009. – Vol. 23, iss. 2. – P. 725–733. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2008.02.019.
10. Васильев, А.А. Совершенствование методов оценки технического состояния железобетонных элементов, эксплуатирующихся в условиях атмосферной агрессии / А.А. Васильев // *Строительная наука и техника*. – 2012. – № 2 (41). – С. 21–28.
11. Васильев, А.А. К вопросу необходимости учета карбонизации бетона в нормативных документах Республики Беларусь по оценке технического состояния железобетонных элементов и конструкций / А.А. Васильев // Вестн. БелГУТа: наука и транспорт. – 2017. – № 1 (34). – С. 87–88.
12. Васильев, А.А. К вопросу объективности современной оценки и прогнозирования карбонизации бетона на основе индикаторного метода / А.А. Васильев // Вестн. Брестского гос. техн. ун-та. Сер. Стр-во и архитектура. – 2020. – № 1. – С. 77–80.
13. Васильев, А.А. О необходимости разработки национального нормативного документа по оценке карбонизации бетона / А.А. Васильев // *Вопросы внедрения норм проектирования и стандартов Европейского союза в области строительства : сб. науч.-техн. ст. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: В.Ф. Зверев [и др.]*. – Минск : Белорус. нац. техн. ун-т, 2013. – С. 40–54.
14. Васильев, А.А. Совершенствование оценки и прогнозирования технического состояния железобетонных элементов и конструкций, эксплуатирующихся в различных атмосферных условиях / А.А. Васильев // *Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. / Ин-т БелНИИС ; редкол.: О.Н. Лешкевич [и др.]*. – Минск : Ин-т БелНИИС, 2017. – Вып. 9. – С. 148–167.
15. Васильев, А.А. Оценка карбонизации и развития ее параметров во времени по сечению бетонов для различных эксплуатационных условий / А.А. Васильев // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Стр-во. Прикладные науки. – 2021. – № 8. – С. 43–52.
16. Васильев, А.А. Оценка предельной величины карбонизации бетона / А.А. Васильев, Ю.К. Кабышева, Н.А. Леонов // *Science and education: problems and innovations : сб. ст. VIII Междунар. науч.-практ. конф.* – Пенза : МЦНС «Наука и просвещение», 2021. – С. 22–25.

#### REFERENCES

1. Vasil'ev, A.A. (2019). Prognozirovanie korrozionnoi povrezhdennosti zhelezobetonnykh elementov dlya razlichnykh uslovii ekspluatatsii [Prediction of corrosion damage of reinforced concrete elements for different operating conditions]. *Vestn. BelGUTA: nauka i transport [Bulletin of BSUT: science and transport]*, (2), 37–39. (In Russ., abstr. in Engl.).
2. Vasil'ev, A.A. (2012). *Karbonizatsiya i otsenka povrezhdennosti zhelezobetonnykh konstruksii*. Gomel: BelGUT. (In Russ.).
3. Vasil'ev, A.A. (2019). *Otsenka i prognozirovanie tekhnicheskogo sostoyaniya zhelezobetonnykh konstruksii s uchetom karbonizatsii betona*. Gomel: BelGUT. (In Russ.).
4. Papadakis, V.G., Vayenas, C.G. & Fardis, M.N. (1991). Fundamental Modeling and Experimental Investigation of Concrete Carbonation. *ACI Materials Journal*, 88 (4), 363–373.
5. Kishimoto, Y., Hokoi, Sh., Harada, K. & Takada, S. (2005). Prediction model for carbonation of concrete structure considering heat and moisture transfer. *J. of Structural and Construction Engineering*, (595), 17–23.
6. Czarnecki, L. & Woyciechowski, P. (2008). Methods of concrete carbonation testing. *Construction and Building Materials*, (426), 5–7.
7. Levchenko, V.N., Levchenko, D.V., Zaruba, A.V. & Kel'man, E.I. (2009). Statisticheskie dannye o glubine neutralizatsii betona v zhelezobetonnykh konstruksiyakh [Statistical data on concrete neutralization depth in reinforced concrete structures]. *Vestn. Donbasskoi nats. akad. str-va i arkhitektury [Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture]*, (5), 40–42. (In Russ., abstr. in Engl.).

8. Borodai, D.I. & Matyunin, A.A. (2009). Prognoz srokov karbonizatsii betona zashchitnogo sloya zhelezobetonnykh elementov avtodorozhnykh mostov [Forecast of the time for carbonization of concrete of the protective layer of reinforced concrete elements of road bridges]. *Vestn. Donbasskoi nats. akad. str-va i arkhitektury [Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture]*, (1), 147–151. (In Russ., abstr. in Engl.).
9. Wang, X. & Lee, H. (2009). A model for predicting the carbonation depth of concrete containing low-calcium fly ash. *Constr. and Build. Mater.*, 23 (2), 725–733. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2008.02.019.
10. Vasil'ev, A.A. (2012). Sovershenstvovanie metodov otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya zhelezobetonnykh elementov, ekspluatiruyushchikhsya v usloviyakh atmosfernoї agressii. *Stroitel'naya nauka i tekhnika*, (2), 21–28. (In Russ.).
11. Vasil'ev, A.A. (2017). K voprosu neobkhodimosti ucheta karbonizatsii betona v normativnykh dokumentakh Respubliki Belarus' po otsenke tekhnicheskogo sostoyaniya zhelezobetonnykh elementov i konstruksii [On the issue of the need to take into account the carbonization of concrete in the regulatory documents of the Republic of Belarus on the assessment of the technical condition of reinforced concrete elements and structures]. *Vestn. BelGUTA: nauka i transport [Bulletin of BSUT: science and transport]*, (1), 87–88. (In Russ., abstr. in Engl.).
12. Vasil'ev, A.A. (2020). K voprosu ob"ektivnosti sovremennoi otsenki i prognozirovaniya karbonizatsii betona na osnove indikatornogo metoda [On the issue of objectivity of modern assessment and prediction of concrete carbonization based on the indicator method]. *Vestn. Brestskogo gos. tekhn. un-ta [Vestnik of Brest State Technical University]*, (1), 77–80. (In Russ., abstr. in Engl.).
13. Vasil'ev, A.A. (2013). O neobkhodimosti razrabotki natsional'nogo normativnogo dokumenta po otsenke karbonizatsii betona. In V.F. Zverev (Eds.) [et al.] *Voprosy vnedreniya norm proektirovaniya i standartov Evropeiskogo soyuza v oblasti stroitel'stva: sb. nauch.-tekhn. st.* (40–54). Minsk: Belorus. nats. tekhn. un-t. (In Russ.).
14. Vasil'ev, A.A. (2017). Sovershenstvovanie otsenki i prognozirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya zhelezobetonnykh elementov i konstruksii, ekspluatiruyushchikhsya v razlichnykh atmosferynykh usloviyakh [Perfection of estimation and prognostication of the technical state of the reinforce-concrete elements and constructions, exploited in different atmospheric terms]. In O.N. Leshkevich [et al.] (Eds.) *Problemy sovremenno go betona i zhelezobetona: sb. nauch. tr.* (148–167). Minsk: In-t BelNIIS. (In Russ., abstr. in Engl.).
15. Vasil'ev, A.A. (2021). Otsenka karbonizatsii i razvitiya ee parametrov vo vremeni po secheniyu betonov dlya razlichnykh ekspluatatsionnykh uslovii [Assessment of carbonization and development of its parameters during time crossed concrete for different operating conditions]. *Vestn. Polotsk. gos. un-ta. Ser. F, Str-vo. Prikladnye nauki [Vestnik of Polotsk State University. Part F. Constructions. Applied Sciences]*, (8), 43–52. (In Russ.).
16. Vasil'ev, A.A., Kabysheva, Yu.K. & Leonov, N.A. (2021). Otsenka predel'noi velichiny karbonizatsii betona. In *Science and education: problems and innovations: sb. st. VIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* (22–25). Penza: MTsNS "Nauka i prosveshchenie". (In Russ.).

Поступила 21.04.2022

## ASSESSMENT AND FORECASTING MAXIMUM CARBONIZATION OF CONCRETE

A. VASILIEV

*The article substantiates the need to study the carbonation of concrete and evaluate the maximum carbonization of it. The basic equation of prediction of change in time by concrete cross section of carbonate component of cement-sand fraction of concrete is given. An expression is proposed for estimating the limit value of concrete carbonation (PVC). PVC from concrete composition (amount of used cement) for concrete without additives, compressive strength classes  $C^{8/10}$ – $C^{50/60}$ , mixture compositions, grades for ease of laying P1...P5 and G1...G4 for each class of concrete in terms of compressive strength and different tempering strength of concrete was investigated. The obtained PVC values were analyzed. Dependencies of PVC change on the amount of used cement for any class of concrete in terms of compressive strength and different grades of mixtures in terms of ease of laying, as well as dependence of change of limit value of carbonization of non-addition concrete on the amount of used cement for different tempering strength of concrete and grades of mixtures in terms of ease of laying are obtained.*

**Keywords:** concrete, carbonization, carbonate component, limit value of concrete carbonization.

УДК 624.131

DOI 10.52928/2070-1683-2022-31-8-54-62

**ГРАФ ОБРАБОТКИ ПРИ ГЕОРАДАРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ АНТРОПОГЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ НА УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ**

**Д.В. ИВАНОВ**, канд. техн. наук, доц. **Ю.Г. МОСКАЛЬКОВА**, **И.В. ГОМЕЛЮК**  
(Белорусско-Российский университет, Могилев)  
ORCID <https://orcid.org/0000-0003-3293-8880>, <https://orcid.org/0000-0002-4107-2452>,  
<https://orcid.org/0000-0001-9240-566X>

*В статье приведен обзор развития георадарных исследований: хотя теоретические основы георадарного метода заложены достаточно давно, практически реализовать данный метод стало возможно только в последние годы. Поскольку изменение диэлектрической проницаемости зависит от большого количества факторов, на сегодняшний день возникают сложности с установлением корректности полученных георадарных данных. Целью настоящего исследования являлась разработка эффективного графа обработки и интерпретация георадарных профилей, полученных на основе геофизических изысканий на урбанизированных территориях. Район исследования расположен на правом берегу реки Днепр в г. Могилеве (Республика Беларусь), где ранее, согласно архивным данным, были расположены жилые кварталы. Разработанный граф обработки основан на комбинации следующих методов: усиление отдельных сигналов, метод вычитания среднего, полосовой фильтр. С применением предложенного графа обработки на основе данных о диэлектрической проницаемости получена информация о форме и глубине залегания объектов искусственной природы, погребенных в культурном слое.*

**Ключевые слова:** георадар, георадарный профиль, граф обработки, интерпретация, археология, инженерно-геофизические изыскания.

**Введение.** Геофизические изыскания, в частности, с применением георадара, в последнее время стали важной частью археологических исследований [1; 2]. В археологии изыскания обычно проводятся в местах предполагаемой деятельности человека, т.е. на местах расположения городищ, кварталов городской застройки и т.п., поскольку в таких местах наиболее высока вероятность обнаружения исторически значимых находок. Такие находки всегда имеют искусственную природу и по физическим свойствам отличаются от вмещающих отложений. По этой причине эффективным является применение геофизических изысканий, которые относятся к неразрушающим методам, и их применение позволяет предварительно определить положение археологических объектов без проведения раскопок. Также к преимуществам геофизических изысканий можно отнести высокую скорость и относительно небольшую стоимость проводимых исследований.

Теоретические основы георадарных исследований были разработаны в начале XX века, однако в тот период времени не было практической возможности реализовать данный метод аппаратно. Достаточное развитие технологии получили в середине 80-х годов XX века [1]. Тем не менее повсеместное применение георадарный метод нашел только в последние 10 лет, когда стали широко распространены портативные устройства для получения, обработки и хранения информации. Ввиду указанных обстоятельств накоплен относительно небольшой опыт использования данного метода, и на сегодняшний день интерпретация георадарных профилей все еще вызывает затруднения, что подтверждается также в работах [3–6]. В связи с этим актуальным является получение новых профилей и разработка предложений по их корректной обработке и интерпретации.

Для проведения исследования было выбрано место, расположенное на правом берегу реки Днепр в г. Могилеве (Республика Беларусь). Вблизи выбранного нами участка исследования расположен Свято-Никольский женский монастырь, основанный в XVII веке [10]. На планах города XVII – начала XX вв. на территории зоны исследования расположены жилые кварталы [11; 12]. Во время Второй мировой войны данный район был полностью разрушен. С 2015 г. началось благоустройство рассматриваемой территории, были проложены автомобильные проезды, пешеходные дорожки, ведется строительство парка<sup>1</sup>. Георадарные исследования на этой территории не проводились, однако данная методика была удачно применена при исследованиях, имевших место на других аналогичных объектах [7–9]. Геофизические изыскания с использованием георадара позволяют выделить перспективные участки на георадарограммах и локализовать применение прямых археологических методов (раскопок). Данные изысканий должны быть обработаны и интерпретированы таким образом, чтобы получить следующую информацию: подтвердить наличие в антропогенном слое объектов искусственной природы (в частности, фундаментов зданий); предварительно определить форму, размеры и материал, из которого изготовлены найденные объекты; выявить их местоположение и глубину залегания.

Существует ряд традиционно используемых методов обработки и интерпретации результатов георадарных исследований. К георадарам разных модификаций прилагается пакет программного обеспечения, включающий набор рекомендуемых методов обработки данных. Как правило, для интерпретатора затруднительным является выбор оптимального сочетания нескольких последовательно применяемых методов для решения конкретной задачи. Необходимо учитывать следующие параметры, влияющие на результат: глубину залегания исследуемых объектов, влажность грунтов, диэлектрическую проницаемость среды, скорость и частоту исходящего сигнала, уточнение диапазона фильтруемых частот.

<sup>1</sup> Официальный сайт парка «Подниколье». URL: <http://mogilev.gov.by/podnikolie/>.

В представленном исследовании данные получены с использованием георадара ОКО-3 (производитель – ООО «Логические Системы», страна производства – Россия, год выпуска – 2018). Для указанного георадара рекомендуется использовать следующие методы обработки: метод вычитания среднего, удаление тренда, горизонтальная медианная фильтрация, реверсирование, выравнивание, выделение огибающей, горизонтальный фильтр, полосовой фильтр, метод синтеза апертуры, обратная фильтрация, деконволюция, преобразование Гилберта и др. В процессе обработки при использовании каждого метода варьируются численные значения используемых фильтров. Для получения корректных результатов необходимо выбрать такое сочетание методов обработки, которое позволит при последующей интерпретации данных получить наиболее полное представление об исследуемых объектах.

Таким образом, предметом исследования являются выбор оптимального сочетания методов обработки и последующая интерпретация антропогенного слоя на георадарных профилях, полученных с использованием георадара ОКО-3.

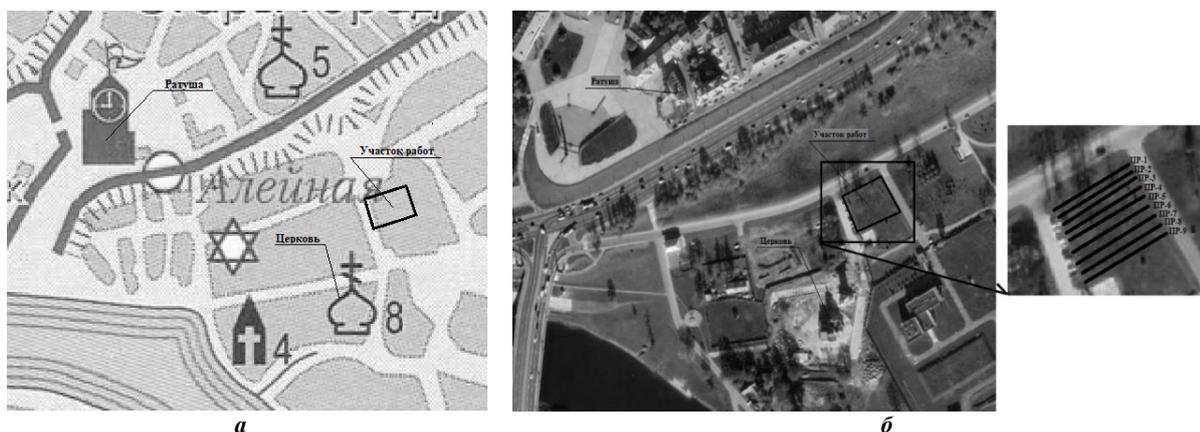
Цель исследования – провести геофизические изыскания на урбанизированных территориях и предложить эффективный граф обработки георадарных профилей, который позволит выявить остатки фундаментов зданий и другие включения искусственной природы в антропогенном слое.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи: изучена архивная информация для выбора участка исследования, сделана разбивка профилей на выбранном участке, проведены георадарные исследования с получением фактического материала, разработан граф обработки георадарограмм и выполнена интерпретация полученных данных.

**Основная часть.** Исследования проводились в ноябре 2021 года. Рельеф площадки ровный, искусственно сформирован при строительном освоении территории, в результате которого были затронуты только поверхностные слои грунта.

Результативность в проведении такого типа исследований во многом зависит от полноты и надлежащего изучения исторической информации, поэтому перед проведением работ были проанализированы архивные материалы и исторические источники<sup>2</sup> [7; 8]. Итогом анализа стало получение данных о расположении в этом районе города бывшей застройки, которая в настоящее время разрушена (рисунок 1, а).

Участок работ (рисунок 1, б) был выбран согласно архивным данным как наиболее перспективный для проведения исследования. Расположенные рядом с участком Свято-Покровская церковь, построенная на фундаменте церкви XVII века, и ратуша, возведенная в 2008 г. на месте ее исторического положения, позволили с высокой точностью привязать место проведения исследования к историческому плану города [13]. На данной территории на протяжении XV–XX вв. городская застройка подвергалась неоднократному разрушению и последующему восстановлению. В результате образовался культурный слой мощностью до 4,5 м, в котором содержится большое количество антропогенных объектов, таких как остатки фундаментов, коммуникаций, мостовых. В связи с вышеизложенным при обработке и интерпретации полученных данных особое внимание уделялось объектам искусственной природы.



а – на карте XVII века; б – на современной карте

Рисунок 1. – Положение зоны исследования

Для проведения исследования был применен метод неглубокой геофизической съемки с использованием радиотехнического прибора подповерхностного зондирования – георадара. Георадарный метод исследования основан на явлении отражения электромагнитных волн от границ раздела сред, на которых меняются электрические свойства. Принцип работы георадара состоит в излучении сверхкороткого высокочастотного электромагнитного импульса и приеме отраженных сигналов. Основным параметром изучаемой среды является ее диэлектрическая проницаемость ( $\epsilon$ ). Отражение электромагнитного импульса происходит на границах изменения диэлектрической

<sup>2</sup> Шляхі магілеўскай гісторыі : зб. нав. ст. удзельнікаў IV Міжнар. навук. канф. «Гісторыя Магілева: мінулае і сучаснасць» / Уклад. І.А. Пушкін, В.В. Юдзін. – Магілёў : Могилевская областная укрупненная типография, 2005. – 488 с.

проницаемости исследуемой среды либо на включенных в эту среду неоднородностях, связанных с наличием природных или антропогенных объектов. Наиболее важными характеристиками для георадарных исследований являются глубина зондирования и разрешающая способность по глубине [1; 14]. Методика георадарных исследований зависит от особенностей целевых объектов и условий исследуемой территории.

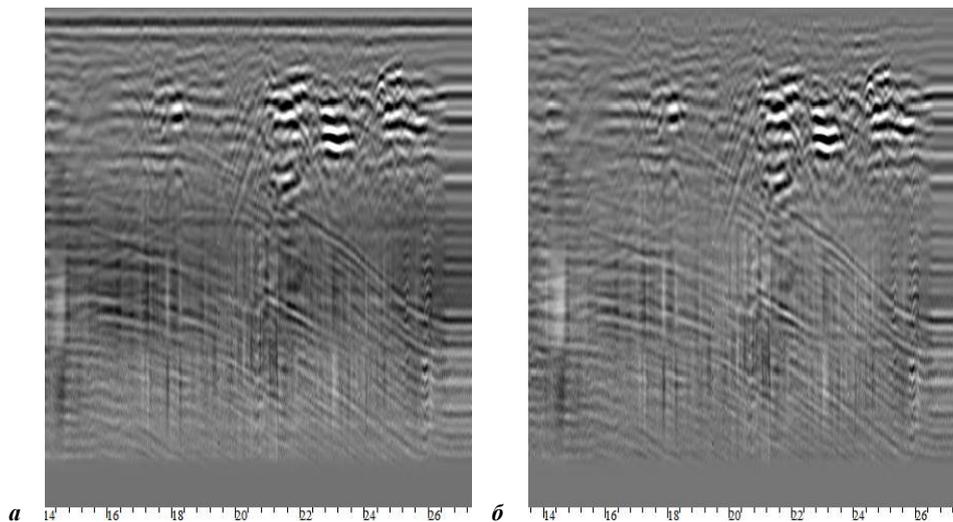
В рамках представленного исследования был применен георадар ОКО-3 с антенной АБ-150, предназначенный для обнаружения различных объектов (в том числе неметаллических). Данный прибор имеет антенный блок на 150 МГц, что позволяет проводить исследования на глубине до 12 м, и разрешающую способность 0,35 м в зависимости от состава грунта. При изысканиях были выбраны следующие параметры: количество точек – 511, датчик перемещения – ДП-32У, режим съемки непрерывный [15; 16].

Для оптимального изучения территории исследования на участке было проложено 9 профилей – от ПР-1 до ПР-9, – каждый длиной 20 м (рисунок 2). Профили располагались параллельно. Общая площадь участка исследований составила 380 м<sup>2</sup>.

Обработка снятых георадарных профилей проводилась по одинаковой схеме посредством программного обеспечения GeoScan и CartScan. Поправки на рельеф не вносились, так как перепад высот на профилях незначителен (в пределах 1 м).

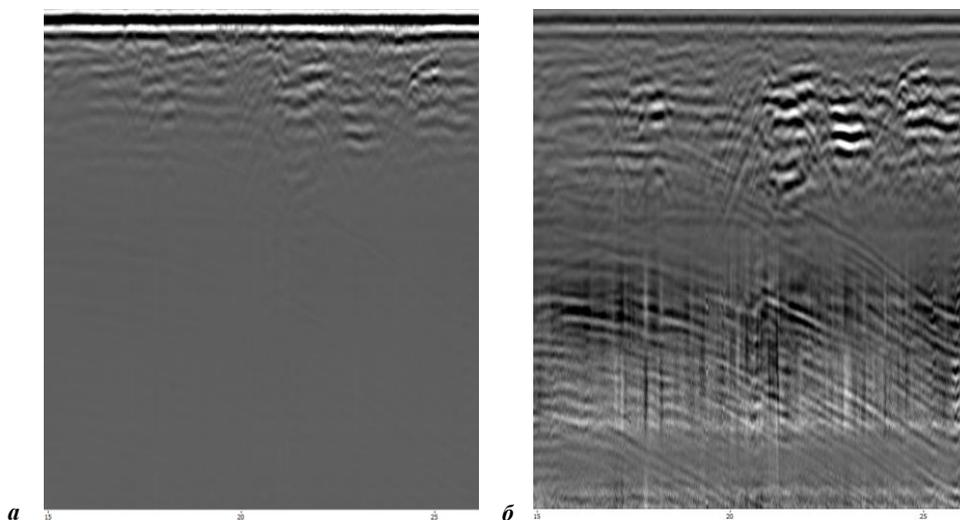
На начальном этапе обработки для улучшения наглядности и возможностей интерпретации были скорректированы определенные сигналы (рисунок 3). Усиление сигналов выполнялось в тех каналах, в которых согласно георадарограммам наблюдались волновые возмущения. Опорные точки подбирались таким образом, чтобы в результате усиления сигнала в области отображения радарограммы волновая картина была более явно выраженной.

Для уменьшения шумов, помех и отраженного сигнала был выбран метод вычитания среднего (см. рисунок 2), который был реализован в скользящем окне таким образом, чтобы были ослаблены высокоамплитудные и усилены низкоамплитудные сигналы при заданном горизонтальном размере окна 50 трасс [1].



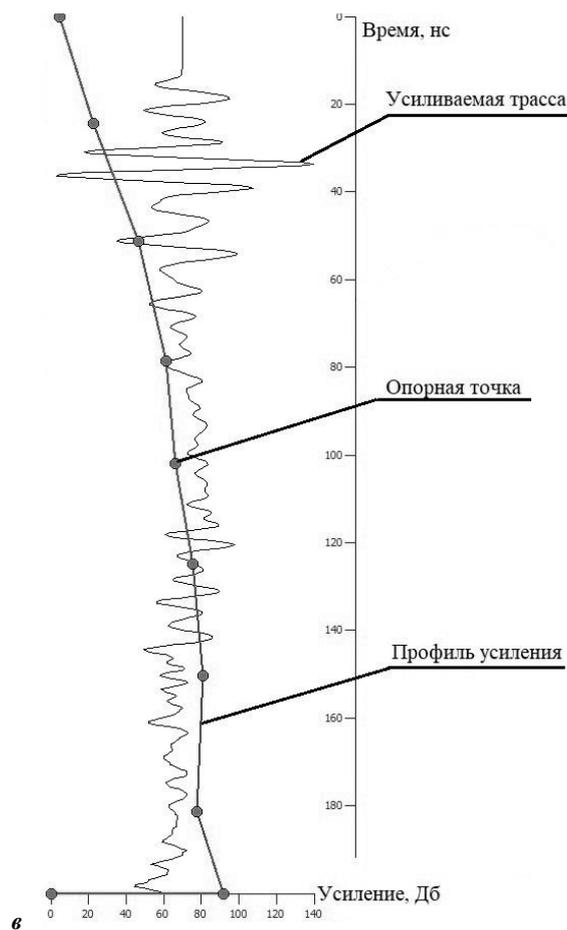
*a* – до вычитания; *б* – после вычитания

Рисунок 2. – Метод вычитания среднего



*a* – до усиления; *б* – после усиления

Рисунок 3. – Усиление сигнала (начало)



**в** – профиль усиления

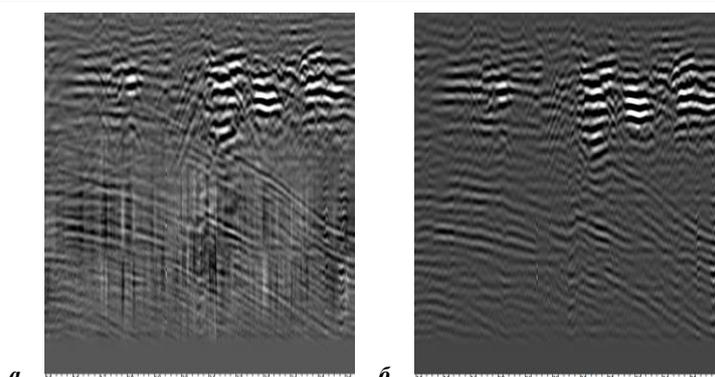
**Рисунок 3. – Усиление сигнала (окончание)**

Для фильтрации георадарограмм достаточно использовать простые типы линейных граничных и полосовых фильтров с трапециевидной формой амплитудно-частотных характеристик (рисунок 4). Подобные фильтры достаточно точны, чтобы ослабить шум без искажения полезного сигнала от объектов, находящихся в антропогенном слое. В основе методов фильтрации лежит прямое и обратное преобразование Фурье [17]. Для оптимизации соотношения сигнал/шум был выбран полосовой фильтр, который позволил подавить низкочастотные кратные волны и высокочастотные шумы. Параметры фильтра были взяты исходя из анализа спектра сигнала, в результате чего примененный диапазон составил от 0,08 до 0,16 ГГц.

Значения параметров обработки сведены в таблицу 1.

Таблица 1. – Параметры обработки

Метод обработки	Параметры обработки
Усиление сигнала	до 93 децибел
Метод вычитания среднего	50 трасс
Полосовой фильтр	от 0,08 до 0,16 ГГц



**а** – до применения фильтра; **б** – после применения фильтра

**Рисунок 4. – Полосовой фильтр (начало)**

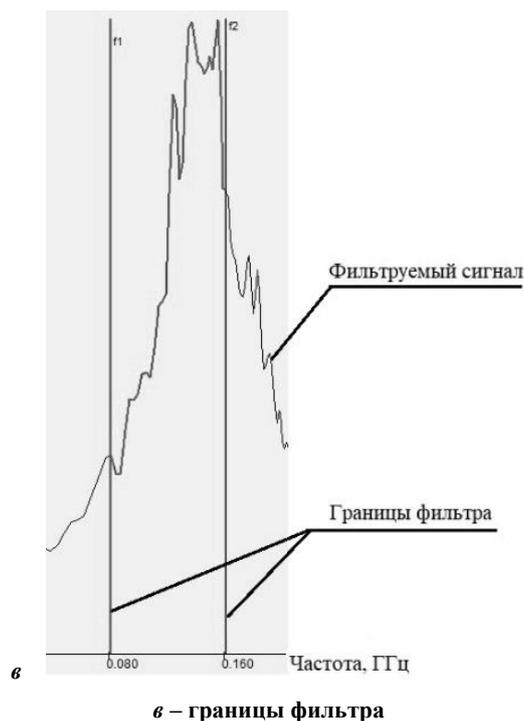


Рисунок 4. – Полосовой фильтр (окончание)

В результате интерпретации данных, полученных при исследовании, установлено, что грунтовая толща в пределах исследуемого участка состоит из трех инженерно-геологических элементов (ИГЭ) (рисунок 5) [18; 19].

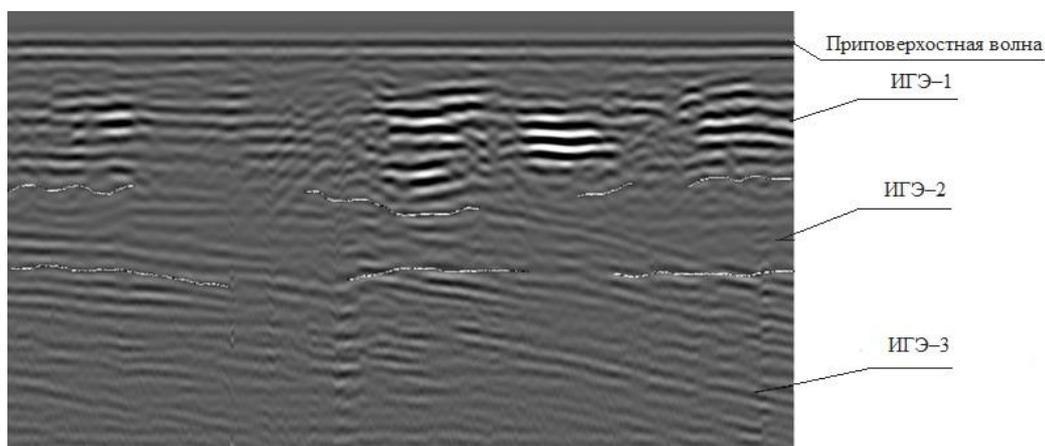


Рисунок 5. – Положение инженерно-геологических элементов на разрезе

Для расчета глубины залегания обнаруженных объектов и интерпретации данных использовались полученные значения диэлектрической проницаемости инженерно-геологических элементов и антропогенных объектов, приведенные в таблице 2.

Таблица 2. – Полученные значения относительной диэлектрической проницаемости и определенные по ним вид грунта и материал объекта

Определяемый элемент или объект	Полученные показатели относительной диэлектрической проницаемости, $\epsilon$	Вид грунта или материала
Инженерно-геологические элементы		
ИГЭ-1	5,4	Антропогенные отложения (культурный слой)
ИГЭ-2	14,3	Песчаный водонасыщенный грунт
ИГЭ-3	5,7	Суглинок или супесь
Антропогенные объекты		
Объект 1	8,4	Древесина
Объект 2	2,6	Кирпич
Объект 3	5,8	Бетон

В верхней части разреза до глубины 4,5 м (ИГЭ-1) представлены антропогенные отложения с включениями объектов искусственного происхождения (предположительно остатки старых фундаментов и т.п.). На некоторых профилях в приповерхностной части прослеживаются уплотненные слои, связанные с планировкой территории.

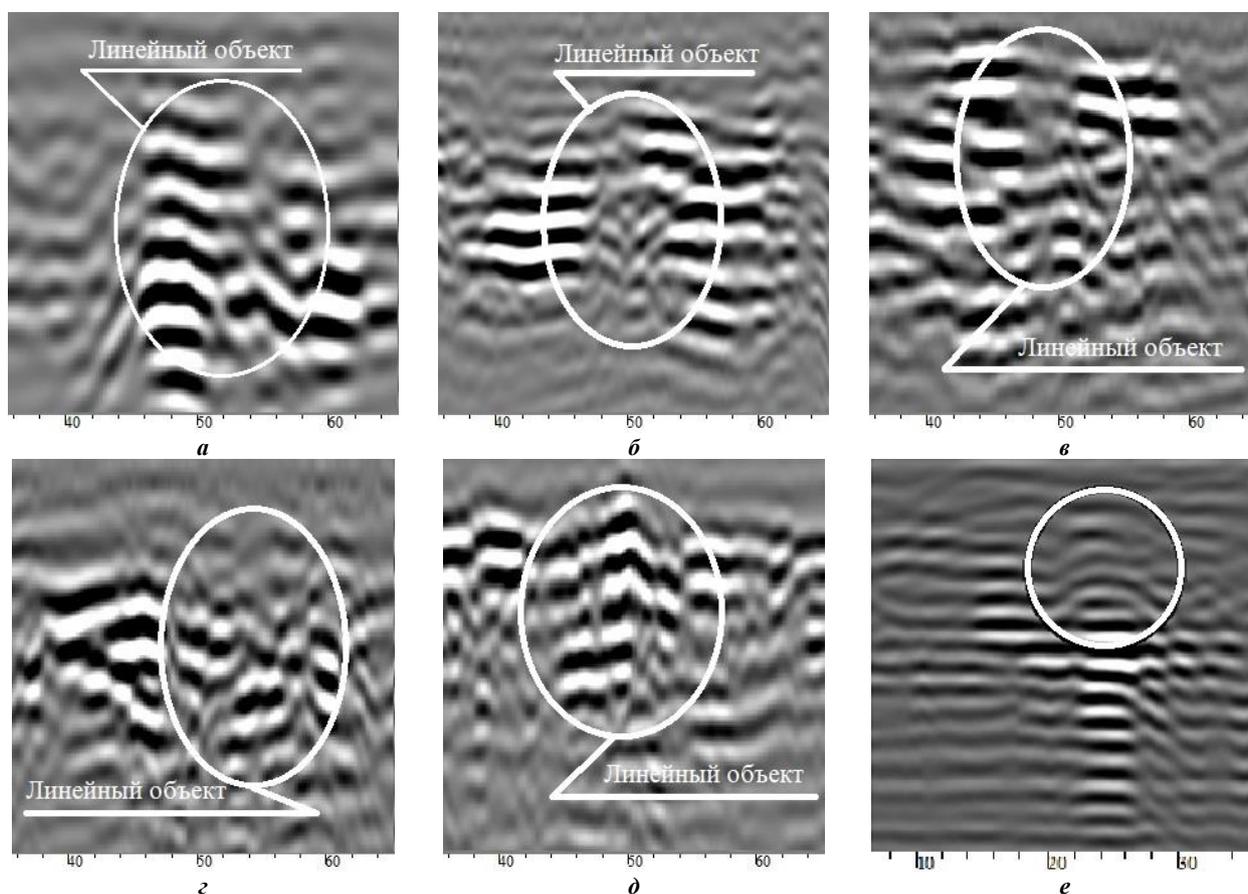
Ниже этой толщи с явным несогласием в залегании располагается слой грунта на глубине от 4,5 до 6,5 м (ИГЭ-2) с высокой диэлектрической проницаемостью ( $\epsilon = 14,3$ ). Диэлектрическая проницаемость указанной части отложений соответствует водонасыщенным грунтам, т.е. ИГЭ-2 является песчаными водонасыщенными отложениями с выраженной слоистостью. Наличие воды можно объяснить близким расположением реки и ее влиянием на близлежащие территории.

В нижней части разреза выделяется инженерно-геологический элемент (ИГЭ-3), характеризующийся однородным залеганием грунта. По параметрам диэлектрической проницаемости этот слой соответствует суглинистым или супесчаным отложениям ( $\epsilon = 5,7$ ).

Несмотря на близость расположения склона и возможность искажений данных из-за его наличия, влияния на результаты исследования отмечено не было.

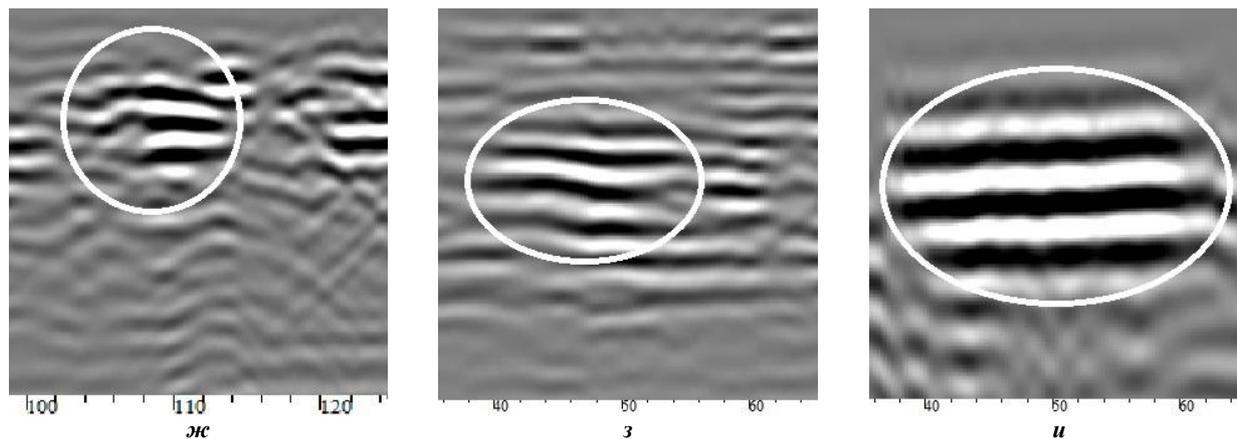
Интерпретация георадарных профилей позволила выделить несколько объектов, идентифицируемых как антропогенные и представляющих интерес для последующих археологических изысканий: на профилях ПР-1–ПР-5 в пикетах 40–60 на глубине 1,3–1,8 м выделяется линейный объект, предположительно являющийся остатками фундамента (рисунки 6, а–д); на профиле ПР-1 в пикетах 10–15 явно выделяется объект, расположенный на глубине 2,2 м, отличающийся повышенными отражающими свойствами и, вероятно, имеющий металлическую природу (рисунок 6, е).

Также на профилях ПР-5, ПР-7, ПР-8 обнаружено несколько объектов, природу которых не удалось идентифицировать. Эти объекты явно визуализируются на георадарограммах (рисунок 6, ж–и), но конфигурация объектов не позволяет их идентифицировать, и при этом для них не удалось установить значения диэлектрической проницаемости, т.к. при определении диэлектрической проницаемости программными методами необходимо построение гиперболы по дифрагированной волне. Для указанных объектов на профилях ПР-5, ПР-7, ПР-8 дифрагированная волна отсутствует. Повторное прохождение над данными объектами дало аналогичные георадарограммы и не обеспечило получение дополнительной информации. Чтобы определить природу подобных объектов, необходимо использовать прямые методы исследования (например, археологические раскопки).



а – профиль ПР-1, пикеты 40–60; б – профиль ПР-2, пикеты 40–60; в – профиль ПР-3, пикеты 40–60;  
г – профиль ПР-4, пикеты 40–60; д – профиль ПР-5, пикеты 40–60; е – профиль ПР-1, пикеты 10–15;

Рисунок 6. – Фрагмент профилей (начало)



ж – профиль ПР–5, пикеты 100–120; з – профиль ПР–7, пикеты 40–60; и – профиль ПР–8, пикеты 40–60

Рисунок 6. – Фрагмент профилей (окончание)

Таким образом, на основании проведенных инженерно-геофизических исследований удалось выделить предположительное положение остатков фундаментов, а также выявить ряд объектов, требующих дальнейшей детализации и изучения с помощью прямых археологических методов. Существует вероятность, что данные объекты могут иметь некоторую ценность (например, историческую), и возможность их обнаружения неразрушающими методами позволит существенно облегчить проведение археологических раскопок.

**Заключение.** Были проведены инженерно-геофизические исследования на месте предполагаемого жилого квартала XVII – начала XX вв. Метод неглубокой геофизической съемки с использованием георадара помог получить информацию об объектах культурного слоя. В результате исследований было выполнено следующее.

1. Разработана комбинация методов обработки полученных георадарных данных (граф обработки), включающий усиление определенных сигналов, метод вычитания среднего, фильтрацию с использованием простых типов линейных граничных и полосовых фильтров.

2. Разработанный граф позволяет обрабатывать георадарограммы антропогенных отложений с наличием в них объектов искусственной природы. По результатам применения разработанного графа обработки данных с его последующей интерпретацией была выполнена разбивка разреза на инженерно-геологические элементы, выявлены особенности этих элементов, определена их диэлектрическая проницаемость. Установлено, что близкое расположение реки по отношению к исследуемому объектам оказывает влияние на георадарные профили: по результатам изысканий диэлектрическая проницаемость части отложений соответствует водонасыщенным грунтам.

3. При интерпретации георадарограмм на основании данных о диэлектрической проницаемости объектов в антропогенном слое выделены объекты (в данном случае предположительно фундаменты разрушенных зданий, фрагменты металлических изделий), подходящие для дальнейшего изучения археологическими методами.

4. Некоторые объекты на георадарограммах не были идентифицированы ввиду недостаточности данных об их природе. Подобные объекты требуют дополнительного изучения с детализацией геофизических данных или проверки другими методами, включая археологические раскопки. Это обуславливает дальнейшее развитие исследований по данной теме.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Владов, М.Л. Введение в георадиолокацию : учеб. пособие / М.Л. Владов, А.В. Старовойтов. – М. : МГУ, 2004. – 153 с.
2. Application of magnetometry, georadar (GPR) and geoelectrical methods in archaeo-geophysical investigation of a Napoleonic battlefield with fortification at Pressburg (Bratislava, Slovakia) / I. Murín [et al.] // J. of Applied Geophysics. – 2022. – Vol. 196. – 12 p. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2021.104493.
3. Старовойтов, А.В. Интерпретация георадиолокационных данных : учеб. пособие / А.В. Старовойтов. – М. : МГУ, 2008. – 192 с.
4. Бондар, К.М. Вивчення ефективності георадарних досліджень на території Національного заповідника «Софія Київська» для вирішення археологічних завдань / К.М. Бондар, Т.А. Бобровський, І.В. Цюпа // Геоінформатика. – 2016. – № 4. – С. 75–82.
5. ERT and GPR Prospecting Applied to Unsaturated and Subwater Analogue Archaeological Site in a Full Scale Laboratory / L. Carozzoli [et al.] // Applied Sciences. – 2022. – Vol. 12, № 3. – 26 p. DOI: 10.3390/app12031126.
6. Ibraheem, I.M. Archaeogeophysical exploration in Neuss-Norf, Germany using electrical resistivity tomography and magnetic data / I.M. Ibraheem, R. Bergers, B. Tezkan // Near Surface Geophysics. – 2021. – Vol. 19, № 1. – P. 603–623. DOI: 10.1002/nsg.12172.
7. Могилевская губерния: государственные, религиозные и общественные учреждения (1772–1917) / Е.К. Анищенко [и др.] ; сост. Ю.Н. Снапковский, Д.Л. Яцкевич ; редкол.: Д.В. Ялевич (гл. ред.) [и др.]. – Минск : Беларусь, 2014. – 814 с.
8. Курков, И.Н. Могилевщина. Легенды, события, люди : моногр. / И.Н. Курков, И.А. Пушкин. – 2-е изд., доп. и перераб. – Минск : Медиафакт, 2008. – 367 с.
9. Галковский, Т.В. Комплексное применение георадарной и магнитной съемки в инженерных изысканиях на объектах социальной инфраструктуры и в археологических исследованиях / Т.В. Галковский, Г.А. Аронов // Инженерная сейсмозащита и сейсмология-2020. Георадар-2020. Теперь вместе : сб. тез. науч.-практ. конф. / Под ред. М.С. Судаковой, М.Р. Садуртдинова. – М. : Изд. дом «Академия естествознания», 2020. – С. 105–109.

10. Результаты исследования геофизическими методами археологического памятника бронзового века городище Андреевское (Южный Урал) / В.В. Носкевич [и др.] // Уральский геофизический вестник. – 2014. – № 1 (23). – С. 72–80.
11. Identification of buried historical mineshaft using ground-penetrating radar / Z. Pilecki [et al.] // Engineering Geology. – 2021. – Vol. 294, № 2. – 13 p. DOI: 10.1016/j.enggeo.2021.106400.
12. Результаты георадарного обследования Ильинской церкви – усыпальницы Богдана Хмельницкого в Субботове / К.М. Бондарь [и др.] // Геофизический журнал. – 2020. – Т. 42, № 3. – С. 173–194.
13. Хомяков, В.Г. Развитие базы туристско-экскурсионной деятельности в Беларуси на рубеже XX–XXI столетий / В.Г. Хомяков, Е.А. Василенко // Весн. Магілёўскага дзярж. ун-та імя А.А. Куляшова. Сер. Д, Эканоміка, сацыялогія, права. – 2015. – № 1 (45). – С. 56–62.
14. Лукин, А.С. Введение в цифровую обработку сигналов (математические основы) : учеб. пособие / А.С. Лукин. – М. : МГУ, 2007. – 54 с.
15. Павлова, В.Ю. Опыт работы с прибором георадар «ОКО-250» для уточнения грунтовых условий на озерновской косе Культурного озера (город Петропавловск-Камчатский) / В.Ю. Павлова, В.А. Соловьев, А.С. Кокорева // Вестн. КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. – 2021. – Т. 35, № 2. – С. 110–119.
16. Эффективность технического обследования с применением георадара / Б.Б. Кульбаев [и др.] // Вестн. АО «КазНИИСА». – 2020. – № 3. – С. 50–61.
17. Сергиенко, А.Б. Цифровая обработка сигналов / А.Б. Сергиенко. – СПб. : Питер, 2003. – 608 с.
18. High-resolution reflection seismics reveal the structure and the evolution of the Quaternary glacial Tannwald Basin / T. Burschil [et al.] // Near Surface Geophysics. – 2018. – Vol. 16, № 6. – P. 593–610. DOI: 10.1002/nsg.12011.
19. Финкельштейн, М.И. Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии / М.И. Финкельштейн, В.А. Кутев, В.П. Золотарев. – М. : Недра, 1986. – 128 с.

## REFERENCES

1. Vladov, M.L. & Starovoitov, A.V. (2004). *Vvedenie v georadiolokatsiyu*. Moscow: MGU. (In Russ.).
2. Murin, I., Neumann, M., Brady, C., Batora, J., Capo, M. & Drozd, D. (2022). Application of magnetometry, georadar (GPR) and geoelectrical methods in archaeo-geophysical investigation of a Napoleonic battlefield with fortification at Pressburg (Bratislava, Slovakia). *J. of Applied Geophysics*, 196. 12. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2021.104493.
3. Starovoitov, A.V. *Interpretatsiya georadiolokatsionnykh dannykh*. Moscow: MGU. (In Russ.).
4. Bondar, K.M., Bobrovskii, T.A. & Tsyupa, I.V. (2016). Vivchennya efektyvnosti georadarnikh doslidzhen' na teritorii Natsional'nogo zapovidnika «Sofiya Kiivs'ka» dlya virishennya arkeologichnykh zavdan' [Efficiency of GPR survey for archaeological targets detection in the national conservation area of “St. Sophia of Kyiv”]. *Geoinformatika*, (4), 75–82. (In Ukr., abstr. in Engl.).
5. Capozzoli, L., Giampaolo, V., De Martino, G., Perciante, F., Lapenna, V. & Rizzo, E. (2022). ERT and GPR Prospecting Applied to Unsaturated and Subwater Analogue Archaeological Site in a Full Scale Laboratory. *Applied Sciences*, 12 (3), 26. DOI: 10.3390/app12031126.
6. Ibraheem, I.M., Bergers, R. & Tezkan, B. (2021). Archaeogeophysical exploration in Neuss-Norf, Germany using electrical resistivity tomography and magnetic data. *Near Surface Geophysics*, 19 (1), 603–623. DOI: 10.1002/nsg.12172.
7. Anishchenko, E.K., Antonovich, Z.V., Vrublevskii, V.V., Kotik, T.N., Leont'eva, T.E., Lipskaya, L.M., ... Yatskevich, D.L. (2014). *Mogilevskaya guberniya: gosudarstvennye, religioznye i obshchestvennye uchrezhdeniya (1772–1917)*. Minsk: Belarus. (In Russ.).
8. Kurkov, I.N. & Pushkin, I.A. (2008). *Mogilevshchina. Legendy, sobytiya, lyudi*. Minsk: Mediafakt. (In Russ.).
9. Galkovskii, T.V. & Aronov, G.A. (2020). Kompleksnoe primeneniye georadarnoi i magnitnoi "emki v inzhenernykh izyskaniyakh na ob"ektakh sotsial'noi infrastruktury i v arkeologicheskikh issledovaniyakh [Complex application of georadar and magnetic survey in engineered surveys at objects of social infrastructure and archaeological studies]. In M.S. Sudakova (Eds.) & M.R. Sadurtdinov (Eds.) *Inzhenernaya seismorazvedka i seismologiya-2020. Georadar-2020. Teper' vmeste: sb. tez. nauch.-prakt. konf. (105–109)*. Moscow: Izd. dom “Akademiya Estestvoznaniya”. (In Russ., abstr. in Engl.).
10. Noskevich, V.V., Fedorova, N.V., Bebnov, A.S., Vdovin, A.G. & Mekhonoshina, T.L. (2014). Rezul'taty issledovaniya geofizicheskimi metodami arkeologicheskogo pamyatnika bronзового века gorodishche Andreevskoe (Yuzhnyi Ural) [Results of the geophysical research of bronze age archaeological monuments Andreevskoe (Southern Ural mountains)]. *Ural'skii geofizicheskii vestnik*, (1), 72–80. (In Russ., abstr. in Engl.).
11. Pilecki, Z., Krawiec, K., Pilecka, E., Kotyrba, A., Tomecka-Suchon, S. & Latka, T. (2021). Identification of buried historical mineshaft using ground-penetrating radar. *Engineering Geology*, 294 (2), 13. DOI: 10.1016/j.enggeo.2021.106400.
12. Bondar, K.M., Khomenko, R.V., Chernov, A.P. & Kuksa, N.V. (2020). Rezul'taty georadarnogo obsledovaniya Il'inskoi tserkvi – usypal'nitsy Bogdana Khmel'nitskogo v Subbotove [Results of the ground penetrating radar survey in the church of St. Elias – Bohdan Khmelnytsky burial vault in Subotiv]. *Geofizicheskii zhurnal*, 42 (3), 173–194. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.24028/gzh.0203-3100.v42i3.2020.204709.
13. Khomyakov, V.G. & Vasilenko, E.A. (2015). Razvitie bazy turistsko-ekskursionnoi deyatelnosti v Belarusi na rubezhe XX–XXI stoletii [Development of tourism in Belarus at the turn of the XX–XXI centuries]. *Vesn. Magilevskaga dzyarzh. un-ta imya A.A. Kulyashova. Ser. D, Ekanomika, satsyialogiya, prava [Mogilev State A. Kuleshov Bulletin. Ser. D, Economics. Sociology. Law]*, (1), 56–62. (In Russ., abstr. in Engl.).
14. Lukin, A.S. (2007). *Vvedenie v tsifrovuyu obrabotku signalov (matematicheskie osnovy)*. Moscow: MSU. (In Russ.).
15. Pavlova, V.Yu., Solov'ev, V.A. & Kokoreva, A.S. (2021). Opyt raboty s priborom georadar «OKO-250» dlya utochneniya gruntovykh uslovii na ozernovskoi kose Kulturnogo ozera (gorod Petropavlovsk-Kamchatskii) [Features of operating the instrument georadar "OKO-250" for refining the ground conditions on the ozernovskaya kosa Kulturnogo lake (Petropavlovsk-Kamchatsky city)]. *Vestn. KRAUNTs. Fiz.-mat. nauki [Bulletin KRASEC. Physical and Mathematical Sciences]*, 35 (2), 110–119. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.26117/2079-6641-2021-35-2-110-119.
16. Kul'baev, B.B., Khomyakov, V.A., Zhamek, N.A. & Shokbarov, A.M. (2020). Effektivnost' tekhnicheskogo obsledovaniya s primeneniye georadara. *Vestn. AO "KazNIISA"*, (3), 50–61. (In Russ.).
17. Sergienko, A.B. (2003). *Tsifrovaya obrabotka signalov*. St. Petersburg: Piter. (In Russ.).

18. Burschil, T., Bunes, H., Tanner, D.C., Wielandt-Schuster, U., Ellwanger, D. & Gabriel, G. (2018). High-resolution reflection seismics reveal the structure and the evolution of the Quaternary glacial Tannwald Basin. *Near Surface Geophysics*, 16 (6), 593–610. DOI: 10.1002/nsg.12011.
19. Finkel'shtein, M.I., Kutev, V.A. & Zolotarev, V.P. (1986). *Primenenie radiolokatsionnogo podpoverkhnostnogo zondirovaniya v inzhenernoi geologii*. Moscow: Nedra. (In Russ.).

Поступила 08.04.2022

## DATA PROCESSING SEQUENCE FOR GPR INVESTIGATION OF ANTHROPOGENIC SEDIMENTS IN URBANIZED AREAS

D. IVANOV, Y. MASKALKOVA, I. GOMELUK

*The article presents a historical overview of the ground penetrating research (GPR) development. Although the theoretical foundations of the GPR method was formulated many years ago, it has been possible to practically implement this method only in recent years. Nowadays there are difficulties with GPR data analysis because the change in dielectric permittivity depends on a lot of factors. The aim of this study was to develop an effective GPR data processing sequence and interpretation of GPR profiles obtained on the basis of geophysical surveys in urbanized areas. The survey was conducted on the right bank of the Dnieper River in Mogilev (the Republic of Belarus), where previously residential quarters were located (according to architectural data). The developed GPR data processing sequence is based on a combination of the following methods: amplification of individual signals, the method of subtracting the average, a bandpass filter. The proposed data processing sequence is based on dielectric permeability. Information about the shape and depth of the objects buried in the cultural layer was obtained by using the proposed sequence.*

**Keywords:** ground penetrating research, GPR profiles, data processing sequence, interpretation, archeology, engineering-geological survey.

УДК 624.131.3+624.131.8

DOI 10.52928/2070-1683-2022-31-8-63-74

## УНИВЕРСАЛЬНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ОСНОВАНИЯ ВДАВЛИВАЕМОЙ СВАИ НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ ЧАСТНОЙ ЗАДАЧИ МЕХАНИКИ ГРУНТОВ О ЕГО УСТОЙЧИВОСТИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРУНТОВ

канд. техн. наук, доц. В.Н. КРАВЦОВ  
(РУП «Институт БелНИИС», Минск)

*В статье представлен универсальный метод оценки предельного сопротивления оснований вдавливаю с вай всех типов (готовых, набивных), согласно классификации ТКП 45-5.01-254-2012, по физико-механическим характеристикам грунтов, с учетом их конструктивных параметров, технологических аспектов изготовления и устройства. Метод разработан на основе предложенного аналитического решения частной задачи теории предельного равновесия грунтов применительно к устойчивости и несущей способности основания одиночной сваи, нагруженной вертикальной вдавливающей/выдергивающей силой в плоской постановке. Расчет характеристического (несущей способности) и проектного предельного сопротивления основания вдавливаю с вай производится с использованием частных коэффициентов, учитывающих возможность отклонений конструктивных, технологических параметров свай, свойств грунтов от их репрезентативных значений и неопределенности грунтовой модели по сравнению с фактическим поведением нагруженного грунта. Отклонение результатов расчета по предлагаемому методу от опытных данных по результатам испытаний свай статической вдавливающей нагрузкой находится в пределах погрешности метода испытаний.*

**Ключевые слова:** устойчивость, несущая способность, теория предельного равновесия, сопротивление грунта вдавливаю с вай, физико-механические характеристики, частные коэффициенты надежности.

**Введение.** В настоящее время все известные методы оценки несущей способности оснований свай (теоретические численные, инженерно-практические) базируются на идеализированных грунтовых моделях, разработанных с использованием положений теории упругости твердого тела, которые не соответствуют фактическому поведению грунтов под нагрузкой. Отклонения значений несущей способности свай  $F_k$ , рассчитанных по аналитическим (теоретическим) методам расчета, от опытных данных по результатам испытаний достигают 100% и более [1–4].

Более точные и достоверные результаты дают инженерно-практические методы расчета, регламентируемые нормами (ТНПА) и развивающимися их ведомственными документами (пособия, рекомендации)<sup>1,2,3,4</sup>, использующие табличные значения расчетных сопротивлений грунта вдавливаю с вай/выдергиванию в него/из него нижнего конца (пяты)  $R_b$  и ствола  $R_s$  свай. Значения  $R_b$ ,  $R_s$  установлены посредством обработки графиков испытаний различных грунтов сваями для каждого конкретного их типа и не могут быть распространены на другие варианты свай. Недостатками указанных методов является также то, что в них не учитываются фактическое состояние и физико-механические свойства грунтов, конструктивные и технологические особенности изготовления свай (значения  $R_b$ ,  $R_s$  в национальных ТНПА даны до глубины, не превышающей 25 м, по типу грунта для песка (без учета его свойств) или по показателю текучести  $I_L$  для глинистого грунта, определенного непрямым расчетным методом). Это существенно снижает надежность и точность расчетов указанных методов, требует дальнейшего их развития и совершенствования.

Учитывая это, целью настоящей работы стала разработка универсального метода оценки предельного состояния основания вертикально вдавливаемых свай по несущей способности и устойчивости посредством учета экспериментально установленных особенностей их взаимодействия с грунтом на основе полученного теоретического решения об устойчивости основания свай и использования физико-механических характеристик грунтов, лишённого вышеуказанных недостатков нормативных методов расчета (ТНПА)<sup>5,6</sup>.

**Основная часть. Экспериментально-теоретические предпосылки расчета.** Многочисленные экспериментально-теоретические исследования<sup>7</sup> [5–8], в т.ч. собственные [9], показывают, что при действии на основа-

<sup>1</sup> Основания и фундаменты зданий и сооружений. Свай забивные. Правила проектирования и устройства : ТКП 45-5.01-256-2012. – Введ. 01.07.12. – Минск : Минстройархитектуры, 2013. – 137 с.

<sup>2</sup> Проектирование забивных и набивных свай по результатам зондирования грунтов : П2-2000 к СНБ 5.01.01-99. – Введ. 01.07.01. – Минск : Минстройархитектуры, 2001. – 23 с.

<sup>3</sup> Проектирование и устройство фундаментов из свай набивных с уплотненным основанием : П19-04 к СНБ 5.01.01-99. – Введ. 01.07.05. – Минск : Минстройархитектуры, 2006. – 88 с.

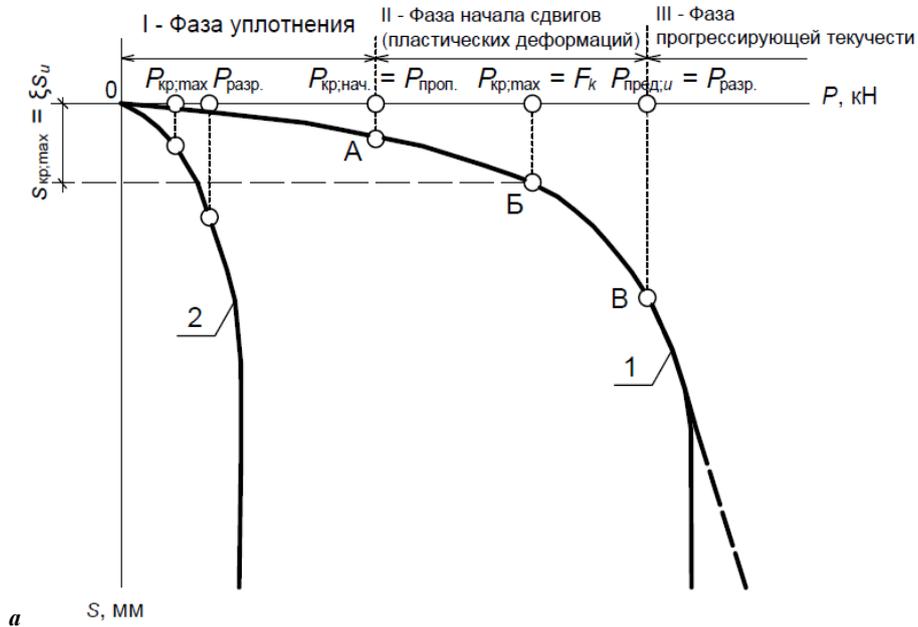
<sup>4</sup> Проектирование и устройство свайных фундаментов : СП 50-102-2003. – Введ. 21.06.03. – М. : Госстрой России, 2008. – 81 с.

<sup>5</sup> См. сноски 1–4.

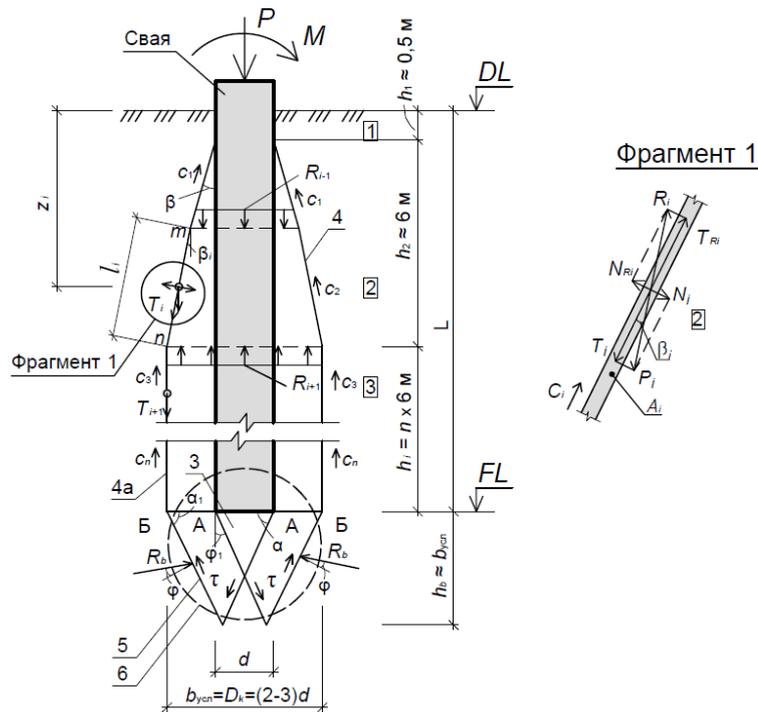
<sup>6</sup> Основания и фундаменты зданий и сооружений. Основные положения. Строительные нормы проектирования : ТКП 45-5.01-254-2012. – Введ. 01.07.12. – Минск : Минстройархитектуры, 2012. – 118 с.

<sup>7</sup> Бахолдин, Б.В. Экспериментальные и теоретические исследования процесса взаимодействия грунта с забивными сваями и создание на их основе практических методов расчета свай : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.02 / Б.В. Бахолдин ; НИИОСП им. Н.М. Герсеванова. – М., 1987. – 48 с.

ние сваи (фундамента) непрерывно возрастающей как вдавливающей, так и выдергивающей нагрузок, ее работа на различных этапах загрузки характеризуется тремя фазами: I – уплотнения, II – сдвига от начальных до нарастающих массивных (пластических) деформаций, переходящих (III-я фаза) в прогрессирующую текучесть грунта (рисунок 1).



a



б

1 – характерный график зависимостей  $s = f(p)$  для вертикально нагруженных свай, испытанных статической вдавливающей нагрузкой в грунтах пониженной прочности (рыхлых, обводненных глинистых с  $I_L > 0,8$ , макропористых и др.); 2 – то же в прочных и средней прочности; 3 – уплотненное жесткое ядро под концом сваи; 4, 5 – поверхности скольжения; 6 – контур деформируемой зоны грунта в уровне пяты; 1 – 3 – блоки оседания; А, Б – соответственно зоны пассивного сопротивления грунта и неподвижной части массива ниже пяты;  $\alpha$  и  $\beta$  – углы наклона поверхностей скольжения (поз. 4 и 5);  $R_b$  – силы (реакции) сопротивления грунта вдавливанию пяты свай  
 а – графики зависимости осадки от нагрузки  $s = f(p)$  для грунтов пониженной прочности (поз. 2), средней прочности и прочных (поз. 1); б – обертывающие поверхности скольжения с учетом жесткого ядра (поз. 3) в неоднородном основании (расчетная кинематическая схема к определению устойчивости свай)

Рисунок 1. – Напряженно-деформационное состояние вертикально нагруженного основания одиночной сваи при полном развитии зон предельного равновесия согласно экспериментальным данным

Начальное критическое давление  $p_{кр.нач.}$  соответствует границе между I и II фазами (точка А на графике 1 рисунка 1, а), до которой преобладают безопасные для устойчивости (прочности) грунтов деформации уплотнения. Превышение этого давления вызывает местную потерю устойчивости грунтов. Поэтому среднее давление на основание зданий и сооружений I-го уровня ответственности (класс надежности RC3), очевидно, не должно превышать его критической величины и не допускать зон пластических деформаций в уровне подошвы пяты свай (фундамента), передающей нагрузку на основание  $p_{кр.нач.} = p_{проп.}$ , принимаемую за предел пропорциональности между давлением и деформацией грунтов –  $p_{кр.нач.} \approx p_{проп.}$ . В то же время для менее ответственных и временных (неответственных) сооружений классов надежности RC1, RC2 (II–III уровней ответственности) вполне допустимо проникновение этих деформаций под опорную часть пяты (фундамента).

Предельное давление  $p_{пред.}$  соответствует полному использованию сопротивления основания сдвигу (точка В на графике 2 рисунка 1, а) и потере его устойчивости ( $p_{пред.} \approx p_{раз.}$ ).

Положение критической точки Б на графике 2 вдавливания сваи (см. рисунок 1, а) определяет как предельно допустимую (критическую) деформацию  $s_{кр.}$ , так и величину сопротивления грунта, соответствующую ей, выраженную абсциссой критического давления  $p_{кр.мах.}$ . Это сопротивление в современной проектной практике принято определять понятием *несущая способность грунта*, которое имеет достаточно неопределенный смысл, т.к. на графике вдавливания сваи, как правило, выражается «не резко» и устанавливается условно. Для придания этому понятию физического смысла несущую способность свай  $F_k$  в нормативной литературе<sup>8</sup> обычно принято назначать при осадке  $s = \xi \cdot s_u$  (где  $s_u$  – предельная осадка сооружения, допускаемая для него нормами<sup>9</sup>), соответствующей пределу пропорциональности, т.е.  $F_k \leq p_{кр.мах.} = R_k$  ( $R_k$  – характеристическое сопротивление грунта вдавлыванию в него ствола сваи, кН), в зависимости от конструктивной системы объекта, его назначения и типа грунта.

Для условия предельного равновесия проекции усилий на ось  $z$ , приложенных к деформируемому грунтовому основанию сваи ниже уровня ее пяты, могут быть приведены к трехзвенному виду (согласно решению Н.П. Пузыревского (1929), Н.М. Герсеванова (1930), К. Терцаги (1925–1933), О.К. Фрелиха (1934) и др.).

$$R(\sigma)_{мах} = A \cdot b + B \cdot h + D \cdot c, \quad (1)$$

где  $R(\sigma)_{мах}$  – нагрузка, соответствующая начальному критическому пределу несущей способности основания;  
 $h$  – глубина заложения подошвы фундамента (пригрузка  $q/\rho$ , соответствующая высоте условного слоя грунта);  
 $b, c$  – соответственно ширина (диаметр) фундамента, м, сцепление грунта, кПа;

$A, B, D$  – постоянные для данного грунта коэффициенты его несущей способности, зависящие от угла внутреннего трения  $\varphi$ , град., и плотности  $\rho$ , кН/м<sup>3</sup>.

Версия указанного решения, принятая в нормах Республики Беларусь для определения  $p_{кр.мах} = R_k$  с соответствующими коэффициентами  $A, B, D$ , приведена в ТКП 45-5.01-67-2007<sup>10</sup> и с достаточной для практических целей точностью может быть использована при оценке сопротивления грунта вдавлыванию в него пяты сваи. Для оценки сопротивления грунта вдавлыванию в него ствола сваи дополнительно рассмотрим частную задачу общей теории предельного напряженного состояния об устойчивости основания, нагруженного вертикальной вдавливающей силой.

**Частное решение задачи устойчивости основания вдавливаемой (выдергиваемой) сваи с использованием физико-механических характеристик.** Выполненный анализ экспериментально-теоретических данных о разрушении вертикально нагруженных оснований фундаментов и свай в стадии их предельного равновесия<sup>11</sup> [1; 3; 8; 9; 10–13] показал, что характер потери устойчивости и сопротивление грунта вдавлыванию в него ствола сваи (несущая способность) полностью соответствуют предпосылкам и положениям теории предельного равновесия грунтов, т.к. решающую роль в процессе их разрушения играют сдвиги (нарушения внутреннего равновесия) по поверхностям скольжения, возникающим в отдельных объемах грунта по длине ствола и под нижним концом вдавливаемой (выдергиваемой) сваи (см. рисунок 1, б).

В связи с этим, для оценки степени устойчивости и исследования условий возникновения сдвигов в основании сваи, в данном и ряде других случаев, рассмотренных в работах Б.В. Бахолдина, В.Г. Березанцева, А.А. Григорян, В.Н. Кравцова, Ф.К. Лапшина, В.А. Флорина<sup>12</sup> [5; 6; 9; 10–12], вполне очевидна возможность применения общей теории предельного равновесия грунтов. Решение об устойчивости основания сваи в данном случае можно отнести к ее элементарной частной задаче механики грунтов, которая заключается в определении условия равновесия при фиксированной поверхности скольжения, образующейся в результате сдвига оседаемых/выпираемых недеформируемых блоков грунта под/над пятой сваи относительно неподвижного окружающего его массива.

Рассмотрим условия предельного равновесия (устойчивости) основания сваи при воздействии предельного усилия вдавливания  $P$ /выдергивания  $P_v$ , приложенного к нему по оси его симметрии (решение для выдергиваемой сваи дано в работе [14]) с использованием расчетной (кинематической) схемы на рисунке 1, б.

<sup>8</sup> См. сноски 1–4, 6.

<sup>9</sup> См. сноску 6.

<sup>10</sup> Фундаменты плитные. Правила проектирования : ТКП 45-5.01-67-2007. – Введ. 01.09.07. – Минск : Минстройархитектуры, 2008. – 136 с.

<sup>11</sup> См. сноску 7.

<sup>12</sup> См. сноску 7.

На основании экспериментальных исследований [8; 9] примем, что при воздействии на сваю вдавливающей силы  $P_{кр, \max}$  (см. рисунок 1, а) вдоль ее ствола и под пятой концентрируются сдвигающие напряжения, формирующие тело оседания в форме отдельных блоков, в верхней зоне ствола в виде одного усеченного конуса (см. рисунок 1, б), с верхним меньшим основанием равным, примерно, площади сваи и боковой поверхностью, наклоненной вниз под углом  $\beta$  к вертикали. С глубины более 6 м блоки оседания, с учетом опытных данных, приняты цилиндрической формы. Площади  $A$  боковых обертывающих поверхностей сдвига верхнего усеченного конуса (пирамиды) и ниже лежащих цилиндрических блоков оседания по существу являются фиксированными поверхностями предельного равновесия (скольжения), направленными вниз, согласно опытным данным для верхнего блока, под углом  $\beta \leq 6^\circ$  (см. рисунок 1, б). Поэтому, согласно теории предельного равновесия грунтов, несущая способность основания сваи может быть найдена из уравнений равновесия для каждого отсека  $\boxed{1}$  –  $\boxed{3}$  на рисунке 1, б суммированием критических нагрузок  $P_i$  в каждом отсеке, воспринимаемых ими в момент потери грунтом устойчивости.

Рассмотрим условия равновесия  $i$ -го отсека (конуса оседания), например,  $\boxed{2}$  на рисунке 1, б в плоской постановке, приведя конус (пирамиду) в плоскости чертежа к трапеции с боковыми гранями, направленными вниз от верхнего основания, размером  $d$ , к большему нижнему, размером  $D_k$ , под углом к вертикалям  $\beta_i$ .

К отсеку при предельном равновесии приложены следующие внешние усилия: дополнительное  $P_i$  от внешней нагрузки  $P$ , реакции от верхнего  $R_{i-1}$  и нижнего  $R_{i+1}$  оседаемых отсеков (блоков) и собственный вес отсека  $G_{gi}$   $\boxed{2}$  с участком сваи. Раскладываем равнодействующую силу  $P_i$  в точке приложения к единице площади плоскости сдвига поверхности скольжения  $nm$  на ее составляющие: нормальную  $N_i$ , и касательную  $T_i$ :

$$T_i = P_i \cdot \cos \beta_i; \quad N_i = P_i \cdot \sin \beta_i. \quad (2)$$

Внешним усилиям на плоскости сдвига (см. рисунок 1, б) при предельном равновесии противодействуют следующие внутренние силы, направленные в обратную сторону от сил сдвига: сцепления  $c_i$ , на поверхности скольжения  $nm$ , сопротивления грунта вдавливанию сваи  $R_i$  и ее составляющие: касательная  $T_{Ri}$  (сила трения) и нормальная  $N_{Ri}$  (реакция отпора грунта основания к грани  $nm$ ):

$$c_i = \sum c_{k,si} \cdot l_i; \quad N_{Ri} = R_i \cdot \sin \beta = \gamma_{k,si} \cdot z_{si} \cdot \sin \beta_i; \quad T_{Ri} = f_i \cdot N_i = \operatorname{tg} \varphi_{k,i} \cdot N_i, \quad (2a)$$

где  $\gamma_{k,si}$  – эквивалентный (средний) удельный вес грунтов выше рассматриваемого отсека;  
 $z_{si}$  – мощность грунтов от поверхности до геометрического центра отсека  $h_i$ .

Составим общее уравнение предельного равновесия для отсека  $h_i$ , спроектировав все силы на наклонную грань поверхности сдвига  $nm$  и на нормаль к ней реакции  $N_{Ri}$ , отнеся их к единице площади плоскости сдвига  $A_{si}$ .

$$T_i = T_{Ri} + c_{k,si} \cdot l_{si} + \sum R_i = f_i \cdot N_{Ri} + c_{k,si} \cdot l_i + R_{i+1} \cdot \cos \beta_i - (R_{i-1} + G_{gi}) \cdot \cos \beta_i; \quad (3)$$

$$N_{Ri} = N_i + \sum R_i = N_i + R_{i+1} \cdot \sin \beta_i - (R_{i-1} + G_{gi}) \cdot \sin \beta_i. \quad (4)$$

Подставив (4) в (3), получим с учетом коэффициента устойчивости основания сваи « $k$ »

$$k \cdot T_i = f_i \cdot N_i + c_{k,si} \cdot l_i + R_{i+1} (f_i \cdot \sin \beta_i + \cos \beta_i) - (R_{i-1} + G_{gi}) (f_i \cdot \sin \beta_i + \cos \beta_i). \quad (5)$$

Используя формулы разности двух углов  $\sin(\varphi_i + \beta_i)$  и принимая во внимание, что  $f_i = \operatorname{tg} \varphi_{k,i} = \frac{\sin \varphi_{k,i}}{\cos \varphi_{k,i}}$ , решим его относительно  $R_{i-1}$  с учетом полной площади обертывающей поверхности скольжения  $A_{si}$ .

$$R_{s,i-1} = \frac{A_{si} (k \cdot T_i - \operatorname{tg} \varphi_{k,i} \cdot N_i - c_{k,i} \cdot l_i) \cdot \cos \varphi_{k,i}}{\cos(\varphi_{k,i} + \beta_i)} + (R_{i+1} \pm G_{gi}), \text{ МН.} \quad (6)$$

Формула (6) дает возможность определить максимальную несущую способность грунта основания как вдавливаемой, при знаке « $-$ », так и выдергиваемой, при знаке « $+$ » и  $R_{i+1} = 0$ , сваи (сопротивление сдвигу) на любом участке  $h_i$  по длине ее ствола. Для вычисления общего значения  $\sum R_{s,i}$  ствола сваи расчет надо начинать с верхнего отсека  $\boxed{1}$  по рисунку 1, для которого  $R_{s,i+1} = 0$ .

**Разработка универсального метода оценки несущей способности свай.** В основу теоретической концепции универсального метода расчета свай положены собственные исследования и приведенные в литературных источниках.

В частности, при определении предельного сопротивления грунта  $P_{пред,и}$  (см. рисунок 1, б) вдавливанию в него сваи использовано известное решение механики грунтов (Н.П. Пузыревский, К. Терцаги, Н.М. Герсеванов) в версии формулы расчетного сопротивления  $R_b$ , используемой в нормах (ТНПА)<sup>13</sup>, и для ствола – решение автора, приведенное выше. Формулы получены для условий плоской задачи с использованием уточненной автором, по результатам исследований, расчетной (кинематической) модели (схемы) основания сваи, нагруженной вертикальной силой (см. рисунок 1, б).

<sup>13</sup> См. сноску 10.

В разработанном методе и расчетной схеме приняты следующие допущения и положения, установленные с учетом опытных данных [1; 8; 9]:

- несущая способность (предельная критическая нагрузка) определяется в данном методе из условия максимально допустимого развития состояния предельного равновесия при осадке, соответствующей критической величине  $s_{кр.макс} = \xi \cdot s_u$  по рисунку 1, а (где  $\xi = 0,2$ ,  $s_u$  – средняя предельная осадка по приложению В ТКП<sup>14</sup>);

- предельное напряженное состояние основания сваи оценивается по напряжению (критическая нагрузка  $P_{кр.макс}$ ), при незначительном увеличении которого нарушается равновесие грунта (устойчивость) и происходит сдвиг по поверхностям скольжения блоков оседания (см. рисунок 1, б);

- расчетная модель (схема) принята из условия, что при нагрузке  $P_{кр.макс}$ , в фазе II (см. рисунок 1, а), происходит развитие пластических деформаций, сдвигов, формирование жесткого ядра (см. поз. 3 на рисунке 1, б) под пятой сваи (зона А) и блоков оседания (1–3) вдоль ствола, с поверхностями скольжения, проходящими по их боковым граням. В верхней зоне, до глубины  $h_2 \leq 6$  м, блок 2 имеет форму усеченного конуса (пирамиды) с боковыми поверхностями, ориентированными под углом  $\beta \leq 6^\circ$  к вертикальной грани сваи, сопрягаемыми с цилиндрической поверхностью блока 3, который в уровне нижнего конца сваи объединяется с зоной А в виде шаровой поверхности, имеющей ограниченные размеры по глубине и ширине  $b_{усл.} \cong h_{усл.} = (2-3)d$  (см. рисунок 1, б);

- усилия сдвига и напряжения от нагрузки  $P_{кр.макс}$  в блоке 1 отсутствуют и, начиная с блока 2, линейно возрастают до глубины 6 м, после чего имеют постоянную величину на цилиндрической поверхности скольжения блока 3;

- сдвиг ствола сваи происходит по поверхности наибольшего сопротивления – не «бетона ствола по грунту», а «грунта по грунту» вдоль поверхностей скольжения блоков оседания (1 – 3), внешние грани которых находятся от граней свай на расстоянии  $\cong (1-2)d$ . Проскальзывание блоков (1 – 3) относительно неподвижного грунта «Б» на рисунке 1, б происходит при нагрузке, соответствующей сдвиговой осадке ствола  $s_{сд.} \cong (5-30)$  мм для забивных и (7–60) мм для набивных свай, которая остается постоянной до момента их «срыва». Дальнейший прирост несущей способности происходит за счет пяты. Для коротких и средней длины свай ( $L < 12$  м) соотношение между нагрузкой, передаваемой на грунт стволом  $R_s$ , и пятой  $R_b$  при  $P_{разр.}$  составляет  $\cong (50$  на  $50)\%$ , для длинных  $\cong (70$  на  $30)\%$ . У длинных свай ( $L/d \geq 20$ ) вдавливающая нагрузка может не передаваться на пяту вплоть до нагрузки  $\cong P_{кр.нач.}$ , соответствующей осадке  $\cong s_{сд.}$ , в результате чего ниже конца сваи формируется жесткий клин 3 (см. рисунок 1, б). После превышения  $s_{кр.макс}$  и опускания клина 3 в шаровой поверхности 6 образуются поверхности скольжения, аппроксимированные на рисунке 1, б прямолинейными плоскостями 5, по которым при достижении внешней нагрузки предельной величины  $P = P_{пред.}$  ( $P_{разр.}$ ) происходит внутренний выпор грунта ниже пяты с разрушением основания, потерей его устойчивости, просадкой сваи и формированием новых областей равновесия. При  $L/d \geq 25$  различия в работе свай стоек и защемленных в грунте условно одинаковы.

Исходя из вышеуказанных предпосылок и положений теории предельного равновесия грунта задача разработки универсального метода заключается в определении несущей способности основания свай, гарантировано обеспечивающей не превышение предельного состояния грунта по прочности (при  $s_{кр.макс} = \xi \cdot s_u$ ) посредством введения соответствующих коэффициентов надежности, учитывающих неопределенность характеристических свойств грунтов, конструктивных и технологических факторов их изготовления.

Основные положения разработанной методики с учетом вышеуказанных допущений и предпосылок приведены ниже.

**Универсальный метод расчета предельного состояния основания вдавливаемой сваи по несущей способности грунта с использованием его физико-механических характеристик.** Метод расчета распространяется на определение проектной (расчетной) допускаемой нагрузки  $F_{d;cal} \leq R_{d;cal}$  на готовые набивные сваи и сваи-столбы (далее – сваи) и проектного (расчетного) сопротивления грунта их вдавливанию  $R_{d;cal} = R_{k;cal} / \gamma_k$  с применением формул (7)–(9) по вышеуказанным решениям, в которых характеристическое значение сопротивления грунта в предельном состоянии по несущей способности пяты и ствола ( $R_{b;k;cal}$ ,  $R_{si;k;cal}$ ) рассчитывается с использованием физико-механических характеристических свойств грунтов для оснований фундаментов зданий всех классов надежности RC1–RC3 (для зданий класса RC3 результаты расчетов используются только как предварительные и должны подтверждаться испытанием).

Модели (расчетные схемы) оснований из готовых и набивных призматических, пирамидальных и цилиндрических свай приведены на рисунке 2.

Характеристическое сопротивление (несущая способность) грунта вдавливанию вертикально нагруженных готовых, набивных защемленных свай призматической, пирамидальной, цилиндрической продольных форм, сплошных и полых (кольцевых), круглого, квадратного, прямоугольного поперечных сечений, диаметром (большая сторона)  $d = (0,2-0,8)$  м, свай  $d \leq 1,5$  м длиной ( $2 \leq L \leq 35$ ) м<sup>15</sup>  $R_{k;cal}$  определяется методом расчета с использованием свойств грунтов как сумма сопротивления грунта вдавливанию в основание их пяты и ствола, МН, по формуле

$$R_{k;cal} = \gamma_{t1} \gamma_{t2} (\gamma_b \cdot R_{b;k;cal} + \gamma_{si} \sum R_{si;k;cal}), \quad (7)$$

<sup>14</sup> См. сноску 6.

<sup>15</sup> См. сноску 6, таблица 5.2.

где  $\gamma_{t1}$  – коэффициент корреляции условий влияния на несущую способность оснований конструктивных параметров свай (вид (готовая, набивная), сплошная, с полостями), принимаемый по таблице 1;

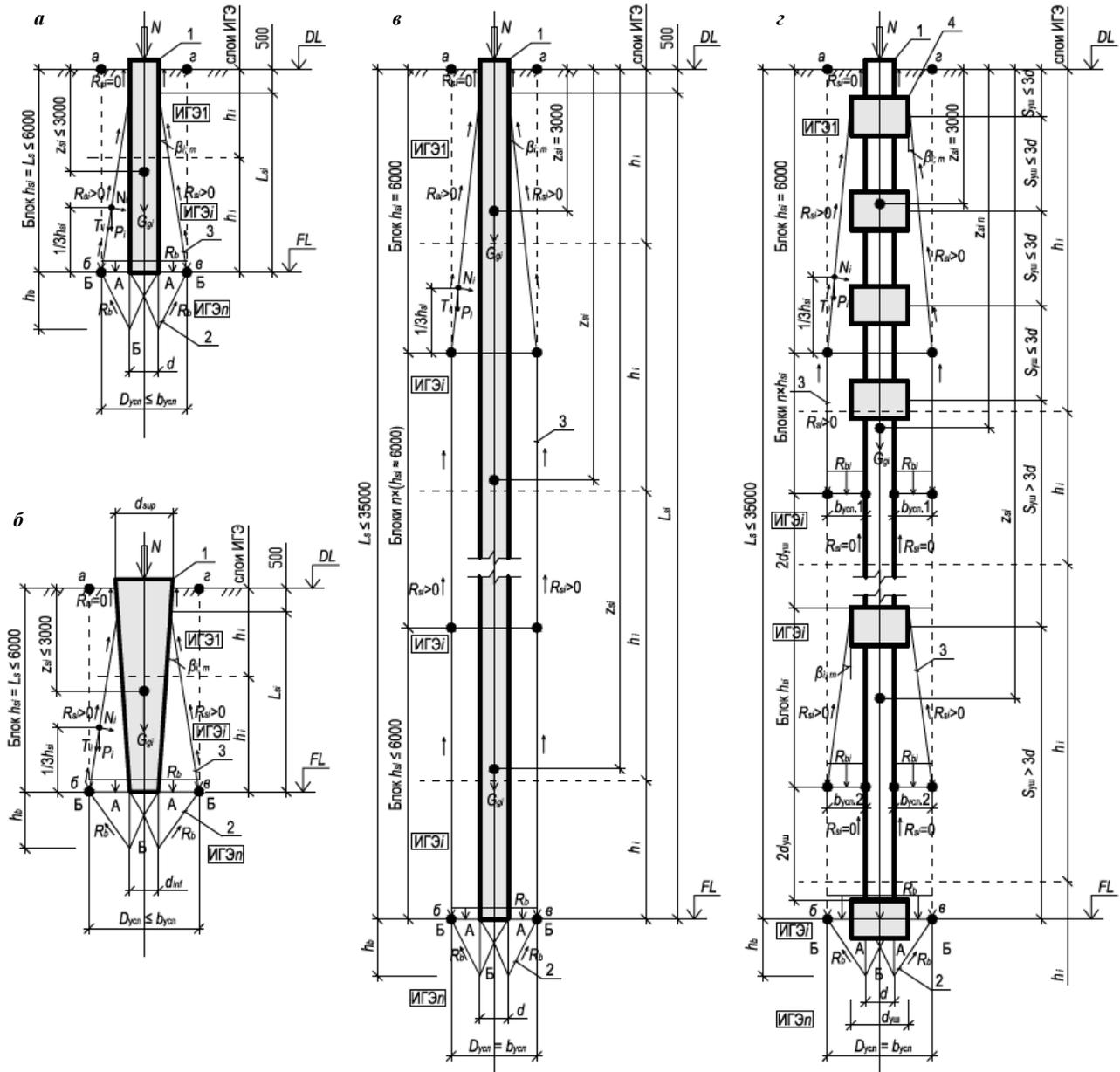
$\gamma_{t2}$  – коэффициент корреляции условий влияния на несущую способность свай способа их изготовления (технологии), принимаемый по таблице 1;

$\gamma_b$  – коэффициент условий работы нижнего конца свай в зоне  $h_b$ , принимаемый по таблице 1;

$\gamma_{si}$  – коэффициент условий работы ствола сваи в зоне  $L_s$ , определяемый по таблице 1;

$R_{b;k;cal}$  – максимальное характеристическое сопротивление грунта основания (несущая способность) вдавливанию нижнего торца сваи (пяты), определяемое по формуле (8), МН;

$\sum R_{si;k;cal}$  – максимальное характеристическое суммарное сопротивление грунта (несущая способность) вдавливанию ствола сваи на участках-блоках  $h_{si} \leq 6$  м (далее блоки), на которые разбивается зона  $L_s$ , определяемое по формуле (9), МН. Слои толщиной менее 6 м суммируются с выше/нижележащими слоями и учитываются в расчетах как один слой с эквивалентными характеристиками.



1 – свая; 2 – аппроксимированная поверхность сдвига (скольжения) в стадии предельного состояния в уровне нижнего конца сваи; 3 – то же, вдоль ствола сваи; 4 – уширение ствола сваи; А – зона внутреннего выпора (пассивного сопротивления сдвигу); Б – зона неподвижного грунта, относительно которой смещается зона А в стадии предельного равновесия; DL, FL – отметки уровней планировки и низа свай;

$S_{ум}$  – шаг уширений по длине ствола сваи; остальные обозначения см. (7), (8)

а, б – соответственно для свай цилиндрических, призматических длиной до 6 м; в – то же, длиной (6 < L ≤ 35) м; з – то же, см. «в», с учетом уширений по длине ствола

Рисунок 2. – Модели (расчетные схемы) для оценки несущей способности оснований свай с учетом их конструктивных и технологических параметров

Таблица 1. – Коэффициенты корреляции условий влияния на несущую способность оснований свай ( $d \leq 1,5$  м)<sup>\*1</sup>

Виды и типы свай, способ изготовления с учетом вида грунтов в основании I–III категорий сложности по приложению А <sup>16</sup>	Коэффициенты корреляции условий влияния на несущую способность свай параметров их конструкций, способа изготовления и работы в грунте					
	$\gamma_{t1}$ (числитель) / $\gamma_{t2}$ (знаменатель) при категории сложности основания			$\gamma_b$ (числитель) / $\gamma_{si}$ (знаменатель) при категории сложности основания		
	I	II	III	I	II	III
1. Готовые (погружаемые) сваи типов: 1.1 Плоские и полые (в т.ч. сваи-оболочки) с закрытым нижним концом (в т.ч. заполненные бетоном), погруженные: 1.1.1 забивкой механическими (подвесными) паровоздушными и дизельными молотами в основания с грунтами: а – однородными средней прочности ( $q_c \geq 2$ МПа, $e \leq 0,55$ , $E > 10$ МПа) и условно однородными многослойными (необходительные основания со слоями средней прочности, если общая толщина биогенных малопрочных и слабых прослоек пониженной прочности не превышает в блоках $h_{si} - 0,3$ м); б – неоднородными с наличием слоев пониженной прочности (водонасыщенных малопрочных (в т.ч. рыхлых): песков и слабых глинистых грунтов ( $E \leq 7$ МПа; $I_L > 0,5$ ; $q_c < 1,5$ МПа), в т.ч. грунтов с содержанием растительных и органических веществ $0,20 \leq I_{om} \leq 0,40$ )	$\frac{1,0}{1,2}$	$\frac{1,0}{1,15}$	–	$\frac{1,1}{1,0}$	$\frac{1,0}{1,0}$	–
2. Набивные (изготавливаемые в грунте) сваи, типов: 2.1 Бурунабивные традиционные, изготовленные в скважинах с выемкой грунта, в т.ч. с уширениями, выполненными механическим способом, бетонизируемые в грунтах: а – по 1.1.1а сухим способом или под защитой обсадной трубы; б – по 1.1.1б под водой или под защитой глинистой суспензии 2.2 Буруинъекционные с опрессованными, обжатыми, раскатанными стенками скважин (например, СФА, РИТ и др.), бетонизируемые в грунтах: а – по 1.1.1а; б – по 1.1.1б 2.3 Набивные в пробитых штампами (пуансонами) скважинах (вытрамбованных, выштампованных, проколотых, в т.ч. инвентарной трубой, виброштампованные и др.), бетонизируемые в грунтах: а – по 1.1.1а; б – по 1.1.1б	–	$\frac{1,0}{1,0}$	$\frac{0,9}{0,8}$	–	$\frac{0,9}{0,9}$	$\frac{0,8}{0,7}$
а – по 1.1.1а сухим способом или под защитой обсадной трубы; б – по 1.1.1б под водой или под защитой глинистой суспензии	$\frac{0,9}{0,8}$	$\frac{0,8}{0,7}$	–	$\frac{0,8}{0,7}$	$\frac{0,7}{0,6}$	–
а – по 1.1.1а; б – по 1.1.1б	–	$\frac{0,7}{0,8}$	$\frac{0,7}{0,7}$	–	$\frac{0,7}{0,7}$	$\frac{0,6}{0,6}$
а – по 1.1.1а; б – по 1.1.1б	$\frac{0,9}{1,0}$	$\frac{0,8}{0,9}$	–	$\frac{0,9}{0,8}$	$\frac{0,8}{0,7}$	–
а – по 1.1.1а; б – по 1.1.1б	–	$\frac{0,7}{0,8}$	$\frac{0,7}{0,7}$	–	$\frac{0,7}{0,7}$	$\frac{0,7}{0,6}$
а – по 1.1.1а; б – по 1.1.1б	$\frac{0,9}{1,0}$	$\frac{0,9}{0,9}$	–	$\frac{0,9}{0,8}$	$\frac{0,8}{0,8}$	–
а – по 1.1.1а; б – по 1.1.1б	–	$\frac{0,8}{0,8}$	$\frac{0,8}{0,7}$	–	$\frac{0,8}{0,7}$	$\frac{0,7}{0,7}$

Примечание. <sup>\*1</sup> – полную версию таблицы 1 см. в СП «Общие положения по проектированию оснований и фундаментов зданий и сооружений».

$$R_{b;k;cal} = [A_b \cdot (N_\gamma \cdot b_{усл} \cdot \gamma_{k;b} + N_q \cdot L_s \cdot \gamma_{k;si;m} + N_c \cdot c_{k;b})] / \xi_b; \quad (8)$$

$$\sum R_{si;k;cal} = \sum \left( \frac{A_{si} \cdot T_{si} \cdot \cos \varphi_{k,i}}{\cos(\varphi_{k,i} + \beta_i)} \mp G_{gi} \right) / \xi_{si}, \quad (9)$$

где «–» – для вдавливаемых, «+» – для выдергиваемых свай;

$\xi_b$  и  $\xi_{si} = 1,4$  – коэффициенты, учитывающие возможность отклонений (грунтовую неопределенность) свойств грунтов на строительной площадке от их характеристических значений, соответственно в зонах  $z_b$  и  $L_s$ ;

$A_b = 0,785 D_{усл}^2$  – условная эффективная площадь передачи нагрузки на грунт в уровне конца (пяты) свай, м<sup>2</sup>;

$D_{усл}$ ,  $b_{усл}$  – условный эффективный диаметр (ширина) свай, равный при  $L_s \leq 6$  м –  $D_{усл} = b_{усл} = d + 2 \cdot L_s \cdot \text{tg} \beta_{im}$ , при  $L_s > 6$  м –  $D_{усл} = d + 1,0$  (здесь  $\beta_{im} = \varphi_k / 4 \leq 6^\circ$ ), м;

$N_\gamma$ ,  $N_q$ ,  $N_c$  – коэффициенты несущей способности основания под пятой свай, зависящие от эквивалентного угла внутреннего трения грунта  $\varphi_{k;b}$  в зоне  $h_b$ , определяемые по таблице 2.

<sup>16</sup> См. сноску 6.

Таблица 2. – Коэффициенты  $N_\gamma$ ,  $N_q$ ,  $N_c$ <sup>\*2</sup>

Угол внутреннего трения $\varphi_{k,b}$	Коэффициенты			Угол внутреннего трения $\varphi_{k,b}$	Коэффициенты		
	$N_\gamma$	$N_q$	$N_c$		$N_\gamma$	$N_q$	$N_c$
0°	0	1,00	3,14	23°	0,69	3,65	6,24
1°	0,01	1,06	3,23	24°	0,72	3,87	6,45
2°	0,003	1,12	3,32	25°	0,78	4,11	6,67
3°	0,04	1,18	3,41	26°	0,84	4,37	6,90
4°	0,06	1,25	3,51	27°	0,91	4,64	7,14
5°	0,08	1,32	3,61	28°	0,98	4,93	7,40

Примечание. <sup>\*2</sup> – полную версию таблицы 2 см. в ТКП 45-5.01-67-2007 «Фундаменты плитные. Правила проектирования»<sup>17</sup>.

$T_{si} = k_1 \cdot T_i - N_i \cdot \operatorname{tg} \varphi_{k,i} - k_2 \cdot c_{k,si} \cdot l_i$  – максимальное сопротивление грунта в предельном состоянии вдоль плоскости сдвига участка-блока (далее – блок) оседания  $h_{si}$ , принимаемое для первых двух блоков на 0,5 м ниже поверхности дна котлована, но не менее  $T_{si} = 0,01$  МПа. При наличии в блоке  $h_{si}$  обводненных слабых и малопрочных (рыхлых) грунтов ( $E \leq 7$  МПа,  $\varphi \leq 18^\circ$ ), слоев с примесью биогенного материала (в т.ч. заторфованных,  $I_{om} < 0,4$ ) –  $T_{si}$  в блоке принимается равным  $T_{si} = 0,01$  МПа, при наличии слоев с  $I_{om} > 0,4$  толщиной  $h_i > 0,3$  м (в т.ч. торф, ил, слабые грунты с  $I_L \geq 1$ ) –  $T_{si}$  принимается со знаком «минус»  $T_{si} = (-)0,01$  МПа;  $k_1$  – коэффициент устойчивости основания в зоне  $h_{si}$  ( $L_s$ ), равный для первого и второго блоков  $h_{si} - k_1 = 1,5$ , а для последующих  $h_{si} - k_1 = 1$ ;  $k_2$  – коэффициент, учитывающий условия работы сил сцепления по глубине основания, равный  $k_2 = 0,5$  для первого и второго блоков оседания  $h_{si}$  и  $k_2 = 1$  – для последующих блоков оседания  $h_{si}$ ;  $T_i = \gamma_{k,si,m} \cdot z_{si} \cdot \cos \beta_i$  – касательная составляющая силы  $P_i$ , равная предельной силе сопротивления грунта сдвигу на единице поверхности скольжения в  $1/3 h_{si}$  для первого блока и в середине последующих блоков оседания  $h_{si}$ , МПа;  $N_i = \gamma_{k,si,m} \cdot z_{si} \cdot \sin \beta_i$  – нормальная составляющая силы  $P_i$  к поверхности скольжения (см. рисунок 2), МПа;  $\gamma_{k,si,m}$  – эквивалентный (осредненный) удельный вес грунта в блоке  $h_{si}$ , МН/м<sup>3</sup>;  $z_{si}$  – расстояние от спланированной поверхности до геометрической середины блока  $h_{si}$ , м (см. обозначение  $T_i$ );  $\beta_{ycl}$  ( $\beta_{i,m}$ ) – угол наклона граней верхнего конуса (пирамиды) блока оседания  $h_{si}$  к вертикали, равный при  $L_s \leq 6$  м –  $\beta_{i,m} = \varphi_{ki,si,m}/4 \leq 5,2^\circ$ ; при  $L_s \geq 6$  м –  $\beta_{i,m} = 0^\circ$ , градус (здесь  $\varphi_{ki,si,m}$  – эквивалентный (осредненный) характеристический угол внутреннего трения грунта в  $h_{si}$ -м блоке оседания, градус, см. рисунок 2);  $G_{gi} = \gamma_{k,si,m} \cdot V_{si}$  – вес блока оседания  $h_{si}$  вместе с участком сваи, МН (см. рисунок 2). Здесь  $V_{si}$  – объем  $i$ -го блока оседания. Допускается  $\gamma_{k,si,m}$  принимать равным 0,020 МН/м<sup>3</sup>.

Расчет значения  $R_{si;k,cal}$  оснований свай производят, начиная с верхнего блока грунта  $h_{si}$ , для которого давление  $R_{i-1}$  от вышележащих блоков  $h_{si}$  отсутствует (равно нулю).

**Пример.** Определить проектное предельное сопротивление грунта основания вдавливанию готовой (забивной) сваи длиной  $L = 12$  м с поперечным сечением (300 × 300) мм, погруженной дизель молотом в неоднородное основание с наличием слоев пониженной прочности III категории сложности по приложению А ТКП 45-5.01-254<sup>18</sup> и проверить выполнение условия не превышения предельного состояния по несущей способности грунта. Согласно п.1.1.16 таблицы 1, коэффициенты условий влияния и работы составляют:  $\gamma_{t1} = 0,9$ ,  $\gamma_{t2} = 0,8$ ,  $\gamma_b = 0,8$ ,  $\gamma_{si} = 0,7$ , т.к. в  $i$ -ом слое ИГЭ I (рисунок 3)  $E < 7$  МПа,  $I_L > 0,5$ ,  $I_{om} = 0,21$ .

Конструктивная характеристика сваи (длина, сечение), расчетная схема и геологическая колонка ее основания с характеристиками грунтов по данным испытаний (от одной скважины) даны на рисунке 3. Репрезентативная (характеристическая) общая осевая вдавливающая нагрузка на сваю  $F_{rep} = 800$  кН, которая включает временное ( $Q$ ) и постоянное ( $G$ ) усилия в пропорции (40/60)%:  $\psi \cdot Q_k = 320$  кН;  $G_k = 480$  кН.

**Решение.** Производится расчет предельных характеристических значений сопротивлений грунта вдавливанию нижнего конца (пяты) и ствола сваи  $R_{b;k,cal}$  и  $R_{si;k,cal}$  по формулам (8) и (9) с использованием физико-механических свойств грунтов, определенных по результатам испытаний (см. ИГЭ на рисунке 3).

Безразмерные коэффициенты несущей способности  $N_\gamma$ ,  $N_q$ ,  $N_c$  в формуле (8) принимаются по таблице 2 для эквивалентного угла внутреннего трения основания сваи в уровне ее нижнего конца в зоне  $h_b$  (ИГЭ IV):  $\varphi_{mean} = 27^\circ$ :  $N_\gamma = 0,91$ ,  $N_q = 4,64$ ,  $N_c = 7,14$ .

Для расчета остальных параметров формул (8), (9) основание сваи по длине ствола разбивается на два блока  $h_{s1} = 6$  м и  $h_{s2} = 5,5$  м (см. рисунок 3), для которых определяются эквивалентные характеристики грунта. Расчеты выполняются по правилам геометрии и тригонометрии, для формулы (9) в табличной форме (таблица 3):

– общие параметры:

$$D_{ycl} = b_{ycl} = d_{sup} + 1,0 = 0,3 + 1,0 = 1,30 \text{ м};$$

$$A_b = 0,7854 \cdot D_{ycl}^2 = 0,7854 \cdot 1,30^2 = 1,33 \text{ м}^2;$$

<sup>17</sup> См. сноску 10, таблица 5.3.

<sup>18</sup> См. сноску 6.



Таблица 3. – Результаты вычисления параметров к примеру

Номер блока	Общие данные	Блок 1 $A_{s1} = \pi \cdot l_{s1} \cdot (R + r)$ , м <sup>2</sup> ; Блок 2 $A_{s2} = \pi \cdot D_{\text{уел}} \cdot h_{k1}$ , м <sup>2</sup>	Блок 1 $G_{g1} = 0,7854 \cdot D_{\text{уел}}^2 \cdot h_{k1} \cdot \gamma_{k;si,m}$ , МН Блок 2 $G_{g2} = 0,7854 \cdot D_{\text{уел}}^2 \cdot h_{k2} \cdot \gamma_{k;si,m}$ , МН	$\gamma_{k;si,m}$ , МН/м <sup>3</sup>	$\varphi_{k;si,m}$ , град, $\cos \varphi_{k;si,m}$ ; $\text{tg} \varphi_{k;si,m}$ , $\cos(\varphi_{k;si,m} + \beta)$	$c_{k;si,m}$ , МПа	$T_i = \gamma_{k;si,m} \cdot z_{si} \cdot \cos \beta$ , МПа	$N_i = \gamma_{k;si,m} \cdot z_{si} \cdot \sin \beta$ , МПа	$T_{si,m} = k_1 \cdot T_i \cdot N_i \cdot \text{tg} \varphi_{k;si,m} - k_2 \cdot c_{k;si,m} \cdot l_{s1}(l_{s1})$ , МПа	$\sum R_{si,k;cat} = \sum \left( \frac{A_{si} \cdot T_{si} \cdot \cos \varphi_{k;si}}{\cos(\varphi_{k;si} + \beta)} - G_{gi} \right) / \xi_{si}$ , МН, $\xi_{si} = 1,4$
Блок 1	$\cos 6^\circ = 0,996$ ; $\sin 6^\circ = 0,0872$	14,07	0,159	0,0200	$\varphi_{k;si,m} = 18,38^\circ$ ; $\cos 18,38^\circ = 0,949$ ; $\text{tg} 18,38^\circ = 0,332$ ; $\cos 24,38^\circ = 0,911$	0,0190	0,074	0,0065	0,056	Т.к. имеются грунты с $I_{om} < 0,2$ , $R_{si} = 0,010$
Блок 2	$\cos 0^\circ = 1$ ; $\sin 0^\circ = 0$ $\varphi_{k;b;m} = 27^\circ$	22,45	0,140	0,0193	$\varphi_{k;si,m} = 33,55^\circ$ ; $\cos 33,55^\circ = 0,833$ ; $\text{tg} 33,55^\circ = 0,663$ ; $\cos 39,55^\circ = 0,771$	0,0095	0,168	0,0	0,116	2,674
Итого: 2,684/1,4 = 1,917										

Проверяется выполнение условия не превышения предельного состояния по несущей способности грунта (проектная нагрузка, допустимая на сваю).

$$N = F_{c;d} \leq R_{c;d}.$$

$$F_{c;d} = \gamma_F \cdot F_{rep} = 1,35 \cdot 0,480 + 1,5 \cdot 0,320 = 1,128 \text{ МН} < R_{c;d} = 1,186 \text{ МН}.$$

Условие не превышения предельного состояния по несущей способности грунта обеспечено. Отклонение значений  $F_{c;d}$ , полученных по результатам статических испытаний свай в районе буровой колонки на рисунке 3, не превысило 20%.

**Заключение.** По итогам выполненной работы можно сделать следующие выводы.

1. На основании анализа собственных и приведенных в литературных источниках опытных данных предложена новая модель (кинематическая расчетная схема) предельного равновесия основания вдавливаемой сваи, нагруженной вертикальной силой (см. рисунок 1, б), в которой плоскости активного сдвига проходят: вдоль ее ствола – по наружным граням грунтовых «блоков оседания», имеющих до глубины 6 м форму конуса, затем цилиндров (сдвиг «грунт по грунту»); под нижним концом – по эллиптическим шаровым поверхностям скольжения, аппроксимированным в плоской постановке прямыми плоскостями (см. рисунок 1, б).

2. Экспериментально установлено, что решающую роль в процессе разрушения (устойчивости) основания сваи играют нарушения внутреннего равновесия в грунте в форме сдвигов в его элементарных объемах, характер которых полностью соответствует положениям и предпосылкам общей теории равновесия грунтов.

Используя предложенную модель основания сваи, принципы и допущения ее взаимодействия с грунтом, установленные опытным путем, получено частное решение задачи механики грунтов об устойчивости сваи и разработан универсальный метод оценки ее несущей способности с использованием физико-механических характеристик грунтов и коэффициентов надежности.

3. Универсальный метод оценки несущей способности оснований свай распространяется на все их типы, регламентируемые ТКП<sup>20</sup> и вошел в СП «Общие положения по проектированию оснований фундаментов зданий и сооружений». Отклонения между результатами, полученными по предлагаемому универсальному методу расчета, и опытными данными находятся в пределах точности метода испытаний.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Жуков, Н.В. Расчет коротких свай на осевые вдавливающие нагрузки / Н.В. Жуков. – М. : ЦНИИЭП-сельстрой, 1989. – 72 с.
2. Meyerhof, G.G. Bearing Capacity and Settlement of Piles Foundations / G.G. Meyerhof // J. of the Geotechnical Engineering. – 1977. – Vol. 103, iss. 9. – P. 1023–1025. DOI: 10.1061/AJGEB6.0000485.

<sup>20</sup> См. сноску 6.

3. Vesic, A.S. Investigations of bearing capacity of piles in sand / A.S. Vesic // Proceedings North American conference on deep foundations. – 1964. – Vol. 1. – P. 197–224.
4. Цитович, Н.А. Механика грунтов (краткий курс) : учеб. для вузов / Н.А. Цитович. – 3-е изд., доп. – М. : Высш. шк., 1979. – С. 130–131.
5. Бартоломей, А.А. Основы расчета ленточных свайных фундаментов по предельно допустимым осадкам / А.А. Бартоломей. – М. : Стройиздат, 1982. – 223 с.
6. Coyle, H. New design correlation for piles in sand / H. Coyle, R. Castello // J. of Geotechnical Engineering. – 1981. – Vol. 107, iss. 7. – P. 965–986.
7. Березанцев, В.Г. Осесимметричная задача теории предельного равновесия сыпучей среды / В.Г. Березанцев. – М. : Гос. изд-во техн.-теорет. лит., 1952. – 120 с. – (Современные проблемы механики).
8. Григорян, А.А. Свайные фундаменты зданий и сооружений на просадочных грунтах / А.А. Григорян. – М. : Стройиздат, 1984. – 162 с.
9. Кравцов, В.Н. Исследование предельных состояний по несущей способности и деформациям глинистых оснований коротких готовых (забивных) свай малого поперечного сечения при их вдавливании и выдергивании / В.Н. Кравцов // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Стр-во. Прикладные науки. – 2021. – № 8. – С. 65–74.
10. Терцаги, К. Теория механики грунтов / К. Терцаги. – М. : Госстройиздат, 1961. – 508 с.
11. Герсеванов, Н.М. Теоретические основы механики грунтов и их практические применения / Н.М. Герсеванов, Д.Е. Польшин. – М. : Стройиздат, 1948. – 247 с.
12. Флорин, В.А. Основы механики грунтов : в 2 т. / В.А. Флорин. – Л. ; М. : Госстройиздат, 1959–1961. – Т. 2 : Деформация и устойчивость оснований сооружений. – 1961. – 543 с.
13. Mindlin, R.D. Force at a point in the Interior of a semi-infinite solid / R.D. Mindlin // J. of Physics. – 1936. – Vol. 7, iss. 5. – P. 195–202.
14. Кравцов, В.Н. Расчет металлических винтовых свай на вдавливающие и выдергивающие нагрузки / В.Н. Кравцов, С. Аль-Тамими // Будівельні конструкції : наук.-техн. зб. / ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій». – Київ : ДП НДІБК, 2013. – С. 167–173.

## REFERENCES

1. Zhukov, N.V. (1989). *Raschet korotkikh svai na osevye vdavlivayushchie nagruzki*. Moscow: TsNIEP-sel'stroi. (In Russ.).
2. Meyerhof, G.G. (1977). Bearing Capacity and Settlement of Piles Foundations. *J. of the Geotechnical Engineering*, 103 (9), 1023–1025. DOI: 10.1061/AJGEB6.0000485.
3. Vesic, A.S. (1964). Investigations of bearing capacity of piles in sand. *Proceedings North American conference on deep foundations, 1*, 197–224.
4. Tsitovich, N.A. (1979). *Mekhanika gruntov (kratkii kurs)*. Moscow: Vyssh. shk. (In Russ.).
5. Bartolomei, A.A. (1982). *Osnovy rascheta lentochnykh svainykh fundamentov po predel'no dopustimym osadkam*. Moscow: Stroiizdat. (In Russ.).
6. Coyle, H. & Castello, R. (1981). New design correlation for piles in sand. *J. of Geotechnical Engineering*, 107 (7), 965–986.
7. Berezantsev, V.G. (1952). *Osesimmetrichnaya zadacha teorii predel'nogo ravnovesiya sypuchei sredy*. Moscow: Gos. izd-vo tekhn.-teoret. lit. (In Russ.).
8. Grigoryan, A.A. (1984). *Svainye fundamenty zdaniy i sooruzhenii na prosadochnykh gruntakh*. Moscow: Stroiizdat. (In Russ.).
9. Kravtsov, V.N. (2021). Issledovanie predel'nykh sostoyanii po nesushchei sposobnosti i deformatsiyam glinistykh osnovanii korotkikh gotovykh (zabivnykh) svai malogo poperechnogo secheniya pri ikh vdavlivanii i vydergivanii [Research of limit states by bearing capacity and deformations of short clay bases finished (driven) piles of small cross-section sections at their pressing and pulling]. *Vestn. Polotsk. gos. un-ta. Ser. F, Str-vo. Prikladnye nauki [Vestnik of Polotsk State University. Part F. Constructions. Applied Sciences]*, (8), 65–74. (In Russ., abstr. in Engl.).
10. Tertsagi, K. (1961). *Teoriya mekhaniki gruntov*. Moscow: Gosstroizdat. (In Russ.).
11. Gersevanov, N.M. & Pol'shin, D.E. (1948). *Teoreticheskie osnovy mekhaniki gruntov i ikh prakticheskie primeneniya*. Moscow: Stroiizdat. (In Russ.).
12. Florin, V.A. (1961). *Osnovy mekhaniki gruntov: v 2 t. T. 2 Deformatsiya i ustoychivost' osnovanii sooruzhenii*. Leningrad; Moscow: Gosstroizdat. (In Russ.).
13. Mindlin, R.D. (1936). Force at a point in the Interior of a semi-infinite solid. *J. of Physics*, 7 (5), 195–202.
14. Kravtsov, V.N. & Al'-Tamimi, S. (2013). Raschet metallicheskich vintovykh svai na vdavlivayushchie i vydergivyayushchie nagruzki. In *Budivel'ni konstruktzii: nauk.-tikhn. zb.* (167–173). Kiiv: DP NDIBK. (In Russ.).

Поступила 29.03.2022

**A UNIVERSAL METHOD FOR ASSESSING THE BEARING CAPACITY OF THE BASE OF A PRESSED PILE BASED ON THE SOLUTION A PARTICULAR PROBLEM OF SOIL MECHANICS ABOUT ITS STABILITY AND THE USE OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF SOILS**

**V. KRAVTSOV**

*The article presents a universal method for assessing the ultimate resistance of base foundations to the pressing of piles of all types (ready-made, stuffed), according to the classification of ТКР 45-5.01-254-2012, according to the physical and mechanical characteristics of soils, taking into account their design parameters, technological aspects of manu-*

*facture and device. The method is developed on the basis of the proposed analytical solution of a particular problem of the theory of the ultimate equilibrium of soils in relation to the stability and bearing capacity of the base of a single pile loaded with vertical indentation/pulling force in a flat formulation. The calculation of the characteristic (bearing capacity) and design limit resistance of the foundation to the pressing of piles is carried out using partial coefficients that take into account the possibility of deviations of the structural, technological parameters of piles, soil properties from their representative values and the uncertainty of the soil model compared with the actual behavior of the loaded soil. The deviation of the calculation results according to the proposed method from the experimental data on the results of testing piles with a static indentation load is within the error of the test method.*

**Keywords:** *stability, bearing capacity, theory of ultimate equilibrium, soil resistance to pile indentation, physical and mechanical characteristics, partial reliability coefficients.*

УДК 624.012.45

DOI 10.52928/2070-1683-2022-31-8-75-80

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ УСИЛЕННЫХ В РАСТЯНУТОЙ ЗОНЕ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ДЕЙСТВИИ ДЛИТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ**

*д-р техн. наук, проф. Д.Н. ЛАЗОВСКИЙ,  
канд. техн. наук, доц. Д.О. ГЛУХОВ, канд. техн. наук, доц. Е.Д. ЛАЗОВСКИЙ  
(Полоцкий государственный университет)*

*В данной статье приводятся предложения по совершенствованию метода расчета параметров напряженно-деформированного состояния изгибаемых железобетонных элементов, усиленных в растянутой зоне, с учетом эффектов ползучести бетона под действием длительно действующей нагрузки. За основу принимается общая нелинейная деформационная модель расчета железобетонных элементов при совместном действии изгибающих моментов и продольных сил, использующая математическое описание диаграмм деформирования бетона и арматуры. Предлагаемая расчетная модель позволяет учесть эффекты изменения деформаций в бетоне под действием длительно действующей нагрузки. Экспериментальная проверка показала удовлетворительную сходимость результатов расчета по предлагаемой методике с опытными данными.*

**Ключевые слова:** железобетон, усиление, ползучесть бетона, общая нелинейная деформационная модель.

**Введение.** Повышение несущей способности эксплуатируемых железобетонных конструкций предполагает выявление при обследовании и усиление их наиболее слабой зоны. Применительно к изгибаемым железобетонным элементам, в зависимости от степени армирования, это может быть растянутая или сжатая зона, зона среза. Для сборно-монолитных изгибаемых элементов – зона контакта сборной и монолитной частей. Если не удастся достичь необходимой степени повышения несущей способности элемента усилением только одной зоны, прибегают к комбинированному усилению двух и более зон.

Усиление изгибаемых железобетонных элементов в растянутой зоне предполагает установку дополнительной арматуры с обеспечением ее совместной работы с усиливаемым элементом приваркой к его оголенной арматуре с последующим обетонированием или приклеиванием полимерраствором к бетону растянутой зоны листовой арматуры, а также размещением стержневой арматуры в предварительно выполненных пазах и последующим заполнением их полимерраствором.

Перед усилением под нагрузкой, с частичным или полным разгрузением, эксплуатируемые железобетонные конструкции имеют напряженно-деформированное состояние, отличное от первоначального после изготовления конструкций. Это связано с предысторией их работы за период эксплуатации до момента усиления.

Дополнительные элементы, включаемые в совместную работу с усиливаемой конструкцией, имеют разный возраст, разные физико-механические и реологические характеристики, включаются в работу в разные моменты времени. Фактически конструкция после усиления превращается в многокомпонентную конструкцию, состоящую из основной части, находящейся в определенном напряженно-деформированном состоянии, и дополнительной части, находящейся в первоначальном состоянии.

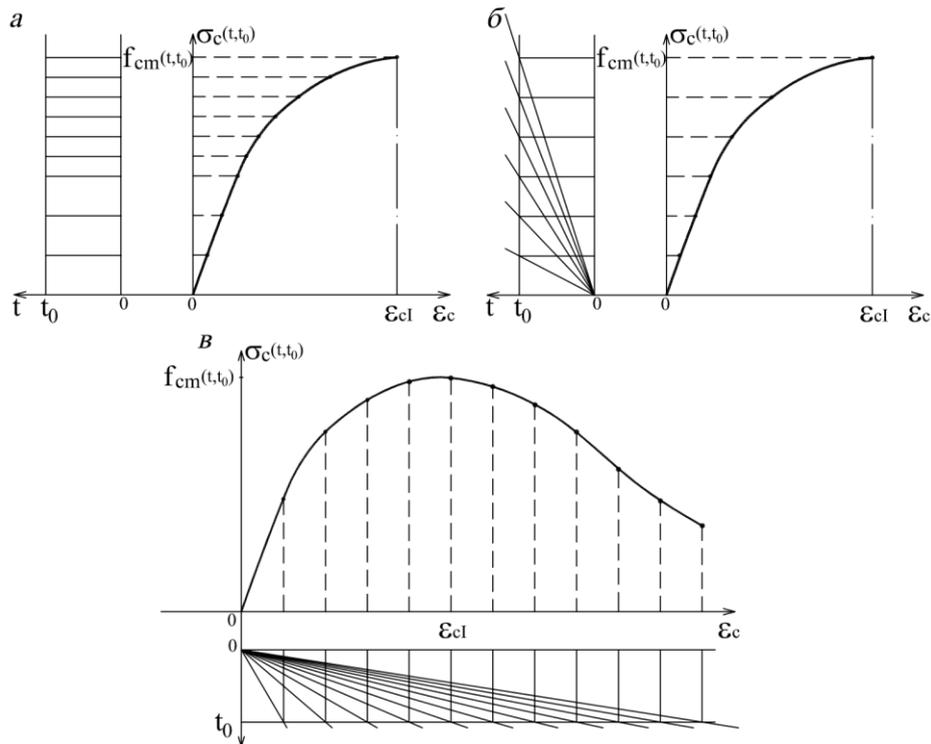
**Расчетные диаграммы деформирования бетона при длительном нагружении.** Общий метод расчета поперечных сечений железобетонных элементов на основе деформационной расчетной модели позволяет получить параметры их напряженно-деформированного состояния, в том числе и элементов, усиленных дополнительными арматурой и бетоном под нагрузкой [1, с. 72]. Для расчета напряженно-деформированного состояния усиленных конструкций необходимо знать геометрические, физико-механические и реологические характеристики их бетона и арматуры, а также бетона и арматуры дополнительных элементов усиления, момент времени и режим нагружения конструкции после усиления.

Диаграммы деформирования бетона, которые используются в деформационной расчетной модели поперечных сечений железобетонных элементов, представляют собой аппроксимацию результатов экспериментальных исследований и относятся к случаю кратковременного нагружения. Экспериментальные диаграммы деформирования бетона при этом получают на стандартных призмах (цилиндрах), испытываемых с постоянной скоростью роста деформаций 2‰ в час. При ступенчатом нагружении величина двух первых ступеней составляет 0.05 от ожидаемого предельного усилия, затем величина ступеней увеличивается вдвое. Начиная со ступени 0.85 от ожидаемого предельного усилия все последующие ступени нагружения снова уменьшают вдвое. На каждой ступени нагрузка выдерживается постоянной 4...5 мин [2].

Расчетные диаграммы деформирования бетона эксплуатируемых конструкций для случая кратковременного нагружения принимают по аналитическим зависимостям и параметрам их базовых точек, прямо или косвенно установленным при их обследовании.

Для вычисления параметров напряженно-деформированного состояния железобетонных элементов в случае длительного нагружения, когда проявляются деформации ползучести бетона и его контакта с арматурой, применяют диаграммы-изохроны [3–5].

Диаграмму-изохрону можно получить экспериментально [6; 7], если нагружать одновременно несколько одинаковых образцов бетона при разных уровнях напряжений в течение одинакового отрезка времени (рисунок 1, а) или нагружать образцы с постоянной скоростью роста напряжений (рисунок 1, б). Если нагружение образцов бетона производить с постоянной скоростью роста деформаций, то экспериментально можно получить нисходящую ветвь диаграммы-изохроны (рисунок 1, в).



*a* – ступенчатом; *б* – с постоянной скоростью роста напряжений; *в* – с постоянной скоростью роста деформаций  
Рисунок 1. – Диаграммы-изохроны бетона при длительном нагружении

Получение диаграмм деформирования бетона при длительном нагружении экспериментальным путем аналогично кратковременному нагружению является сложным вследствие большого количества факторов, влияющих на ползучесть бетона (каждому составу бетона, условиям его твердения, режиму работы соответствует своя деформация ползучести). Поэтому для получения диаграмм деформирования бетона с учетом длительности действия нагрузки используют известные феноменологические теории ползучести, полученные на основе экспериментальных данных при простейших режимах нагружения и последующих обобщений на основе принятых гипотез [8]. Основная гипотеза, используемая для получения зависимости « $\sigma_c(t, t_0) - \epsilon_c(t, t_0)$ » для бетона, заключается в следующем: полные деформации бетона складываются из упругих деформаций, возникающих при кратковременном приложении нагрузки, и деформаций ползучести, развивающихся при длительном действии нагрузки.

По виду зависимостей между напряжениями и деформациями ползучести различают линейную и нелинейную теории ползучести. Область линейной зависимости, как правило, ограничивается определенным уровнем напряжений в бетоне. Например, в нормативном документе [8] область линейной зависимости ограничивается  $\sigma_c \leq 0,4f_{cm}(t_0)$ . Коэффициент ползучести бетона (соотношение деформаций ползучести и упругих деформаций при одной и той же величине приложенного напряжения) в этом случае определяют по формуле

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_{bc}(t, t_0) + \varphi_{dc}(t, t_0), \quad (1)$$

где  $\varphi_{bc}(t, t_0)$  – базовый коэффициент ползучести;

$\varphi_{dc}(t, t_0)$  – коэффициент ползучести высыхания;

$t$  – возраст бетона в рассматриваемый момент времени, сут;

$t_0$  – модифицированный в зависимости от температуры среды и класса прочности цемента возраст бетона в момент нагружения, сут.

В случае высоких уровней сжимающих напряжений в интервале  $0,4f_{cm}(t_0) < \sigma_c < 0,6f_{cm}(t_0)$  определяют модифицированный коэффициент нелинейной ползучести  $\varphi_\sigma(t, t_0)$  по формуле

$$\varphi_\sigma(t, t_0) = \varphi(t, t_0) \exp[1,5 \cdot (k_\sigma - 0,4)], \quad (2)$$

где  $0,4 < k_\sigma = \frac{|\sigma_c|}{f_{cm}(t_0)} < 0,6$  – коэффициент, учитывающий уровень нагружения за пределами области линейной зависимости.

Кроме того, согласно [8], относительные деформации ползучести бетона  $\epsilon_{cc}(t, t_0)$  с начальным модулем упругости  $E_c = 1,05E_{cm}$  железобетонных элементов в момент времени  $t$  при постоянных напряжениях  $\sigma_c$ , приложенных в возрасте бетона  $t_0$ , определяются по формуле

$$\epsilon_{cc}(t, t_0) = \varphi(t, t_0) \cdot \frac{\sigma_c}{E_c}. \quad (3)$$

Значения эффективного модуля деформаций бетона  $E_{c,eff}(t, t_0)$  с учетом длительного действия нагрузки в момент времени  $t$  при действии напряжения  $\sigma_c \leq 0,4f_{cm}(t_0)$  могут быть вычислены по формуле

$$E_{c,eff}(t, t_0) = \frac{E_{cm}}{[1 + \varphi(t, t_0)]}. \quad (4)$$

При напряжениях в бетоне  $\sigma_c > 0,4f_{cm}(t_0)$  в формуле (4) применяют модифицированный коэффициент нелинейной ползучести  $\varphi_\sigma(t, t_0)$ .

Полученные значения эффективного модуля деформаций бетона при разных уровнях напряжения в момент времени  $t$  аппроксимируются кривой, которая является диаграммой-изохроной в заданный момент времени. Кроме того, диаграмму-изохрону можно получить, суммируя относительные деформации ползучести бетона, вычисленные по формуле (3), с упругими относительными деформациями бетона при разных уровнях напряжения в момент времени  $t$ . Все точки диаграммы-изохроны бетона при нарастании длительной нагрузки для разных уровней напряжений достигают своих значений за одинаковый промежуток времени. Полученные таким образом диаграммы деформирования бетона основной и дополнительной частей усиленного железобетонного элемента, учитывающие его ползучесть под нагрузкой, применяют в расчете деформаций железобетонных элементов при длительном действии нагрузки.

**Расчет параметров напряженно-деформированного состояния изгибаемых железобетонных элементов при длительном нагружении.** Система уравнений деформационной модели для расчетного поперечного сечения изгибаемого в одной плоскости железобетонного элемента, состоящая из уравнений равновесия и условия совместности деформаций, описывающего положение плоскости распределения деформаций по поперечному сечению в соответствии с гипотезой плоских сечений, на первом этапе расчета учитывающая предысторию длительного нагружения, имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \int \sigma(t_0)A[y - y_0(t_0)]dy = M(t_0) \\ \int \sigma(t_0)A dy = 0 \\ \varepsilon(t_0) = \frac{1}{r}(t_0)[y - y_0(t_0)] \end{array} \right. , \quad (5)$$

где  $\sigma(t_0)$  и  $M(t_0)$  – нормальные напряжения в элементарной площадке бетона или арматуры и изгибающий момент от внешних воздействий в момент времени усиления элемента;

$\varepsilon(t_0)$  и  $\frac{1}{r}(t_0)$  – относительная деформация в элементарной площадке бетона или арматуры и кривизна элемента в рассматриваемом поперечном сечении в момент времени усиления элемента;

$A$  – площадь поперечного сечения элементарной площадки бетона или арматуры железобетонного элемента.

На втором этапе расчета с учетом наличия основной и дополнительной части усиленного элемента и жесткого контакта между ними, условий равновесия усилий и условий совместности деформирования для усиленного поперечного сечения в момент времени  $t$  уравнения напряженно-деформированного состояния изгибаемого железобетонного элемента, усиленного увеличением поперечного сечения, имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \int \sigma(t)A[y - y_0(t)]dy + \sigma_{ad}(t)A_{ad}[y - y_{0,ad}(t)]dy = M(t_0) + \Delta M(t) \\ \int \sigma(t)A dy + \sigma_{ad}(t)A_{ad} dy = 0 \\ \varepsilon(t) = \frac{1}{r}(t_0)[y - y_0(t_0)] + \frac{1}{r_{ad}}(t)[y - y_{0,ad}(t)] \\ \varepsilon_{ad}(t) = \frac{1}{r_{ad}}(t)[y - y_{0,ad}(t)] \end{array} \right. , \quad (6)$$

где  $\sigma(t)$  и  $\Delta M(t)$  – нормальные напряжения в элементарной площадке бетона или арматуры основной части элемента и приращение изгибающего момента от внешних воздействий в момент времени  $t$  после усиления элемента;

$\sigma_{ad}(t)$  – нормальные напряжения в элементарной площадке бетона или арматуры дополнительной части элемента;

$\varepsilon(t)$  – относительная деформация в элементарной площадке бетона или арматуры основной части усиленного элемента в рассматриваемом поперечном сечении в момент времени  $t$  после усиления элемента;

$\varepsilon_{ad}(t)$  и  $\frac{1}{r_{ad}}(t)$  – относительная деформация в элементарной площадке бетона или арматуры и кривизна дополнительной части усиленного элемента в рассматриваемом поперечном сечении в момент времени  $t$  после усиления элемента;

$A_{ad}$  – площадь поперечного сечения элементарной площадки бетона или арматуры дополнительной части усиленного железобетонного элемента.

С учетом аппроксимаций диаграмм-изохрон для бетона и диаграмм деформирования арматуры основной и дополнительной части усиленного элемента при длительном действии нагрузки вычисляются напряжения в элементарных площадках. Процесс итераций продолжается до получения заданной точности вычисления в условиях равновесия усилий (6).

При необходимости получения несущей способности усиленного элемента нагрузка ступенчато увеличивается. Максимальное усилие от внешней нагрузки, при котором выполняются условия (6), соответствует несущей способности усиленного элемента.

Если железобетонный элемент, находящийся под длительным силовым воздействием, после усиления под нагрузкой догружается кратковременной нагрузкой, то в диаграммах деформирования бетона усиливаемой конструкции учитывается изменение физико-механических свойств бетона вследствие предыстории нагружения до усиления. Изменения свойств бетона связано с природой ползучести, деструктивными процессами при увеличении нагрузки и перемене ее знака. Учет предыстории нагружения бетона производится трансформированием принятой для кратковременного нагружения аппроксимации диаграммы с помощью коэффициентов условий работы бетона [9].

**Экспериментальная проверка.** Экспериментально-теоретическое исследование включало испытание опытной балки, усиленной увеличением поперечного сечения в растянутой зоне, при действии длительной нагрузки и расчеты на основе разработанной методики.

Балка имела прямоугольное поперечное сечение размером  $80 \times 160$  мм и длину 1500 мм. Балка была усилена в растянутой зоне приваркой дополнительной арматуры к существующей с последующим обетонированием. Совместная работа дополнительной арматуры в растянутой зоне усиливаемой опытной балки обеспечивалась приваркой ее по концам к арматуре основной конструкции через коротышки диаметром 12 мм с последующим обетонированием. Совместная работа дополнительного бетона в растянутой зоне с бетоном основной части усиленной балки достигалась насечкой глубиной до 10 мм контактной поверхности растянутой грани перед обетонированием.

Размер и армирование опытной балки определялся мощностью имеющихся пружинных установок для создания длительной нагрузки.

Для приготовления бетона применялся портландцемент марки 500 Кричевского цементного завода. В качестве крупного заполнителя использовался гранитный щебень фракции 5...25 мм. В качестве мелкого заполнителя – кварцевый песок карьера Боровое с объемным весом  $1530 \text{ кг/м}^3$  и модулем крупности 1,62. Бетонная смесь для бетонирования опытной балки приготавливалась с осадкой конуса 3...5 см и водоцементным отношением  $V/C = 0,5$ . Для обетонирования дополнительной арматуры после усиления применялся мелкозернистый бетон с суперпластификатором. Прочностные и деформационные характеристики бетона основной и дополнительной части опытной балки соответственно:  $f_{cm} = 11,2$  МПа,  $f_{ctm} = 1,2$  МПа,  $E_{cm} = 23$  ГПа и  $f_{ctm} = 2,14$  МПа,  $E_{cm} = 32,5$  ГПа.

В качестве продольной арматуры опытной балки использовалась горячекатаная стержневая арматура периодического профиля диаметром 12 мм ( $A_s = 113,2 \text{ мм}^2$ ,  $\sigma_y = 448$  МПа,  $\sigma_u = 640$  МПа,  $E_s = 2,08 \cdot 10^5$  МПа). Дополнительная арматура при усилении растянутой зоны опытной балки была принята диаметром 10 мм ( $A_s = 78,2 \text{ мм}^2$ ,  $\sigma_y = 340$  МПа,  $\sigma_u = 516$  МПа,  $E_s = 2,1 \cdot 10^5$  МПа).

При испытании бетонных призм на сжатие и образцов арматуры на растяжение, кроме основных прочностных и деформационных показателей, определялись диаграммы деформирования бетона для восходящей ветви и арматуры.

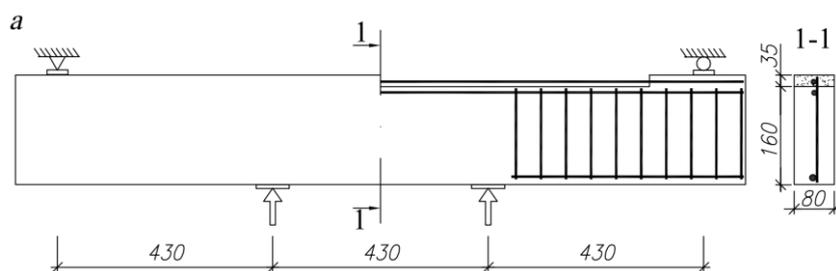
Опытная балка, возраст бетона которой составлял 28 сут, усиленная приваркой дополнительной арматуры в растянутой зоне без предварительного нагружения ( $M/M_u = 0$ ), была испытана длительной нагрузкой, уровень которой составлял  $M/M_{ad,u} = (0,25; 0,75)$ . Длительность испытания балки под нагрузкой на каждой ступени в зависимости от характера нарастания прогибов составляла 30 и 53 сут. Для определения характеристики ползучести одновременно под длительную нагрузку в стандартные пружинные установки были установлены 4 бетонные призмы размером  $100 \times 100 \times 400$  мм из бетона замеса опытной балки, нагруженные до уровня  $\sigma_c/f_{cm} = (0,4; 0,6; 0,7; 0,85)$ . Испытания длительной нагрузкой проводили в течении 83 сут. Это позволило получать основные точки диаграммы изохроны для бетона опытной балки на протяжении всего ее испытания.

Деформации бетона и продольной арматуры (основной и дополнительной) опытных балок измерялись с помощью механических тензометров, индикаторов часового типа, а также прогибомеров. Прогибы опытной балки измерялись с помощью прогибомеров.

С целью удобства испытание опытной балки производилось на испытательном стенде с ориентацией растянутой грани балки вверх. Конструкция опытной балки и схема ее испытания при действии длительной нагрузки с расположением измерительных приборов приведены на рисунке 2.

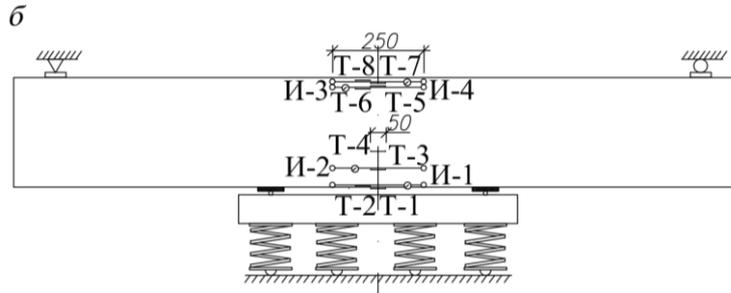
Экспериментальная проверка метода расчета при длительном нагружении изгибаемых железобетонных элементов, усиленных увеличением поперечного сечения в растянутой зоне, состояла в сопоставлении опытных и расчетных значений относительных деформаций основной и дополнительной арматуры, кривизны опытной балки.

Расчет параметров напряженно-деформированного состояния усиленной балки в заданный момент времени при принятом режиме длительного нагружения производился в двух вариантах: 1) по фактическим диаграммам-изохронам для бетона, полученным экспериментально (учитывая уровень нагружения при испытании опытной балки, для расчета достаточно было восходящей ветви); 2) по расчетным диаграммам-изохронам, полученным на основе формул (1–4). При испытании опытной балки длительно действующей нагрузкой за первоначальное состояние принято напряженно-деформированное состояние усиленной балки перед нагружением. Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных значений относительных деформаций основной и дополнительной арматуры, кривизны усиленного элемента показывает удовлетворительную сходимость (рисунок 3).



**a** – конструкции опытной балки

**Рисунок 2.** – Схема испытания опытной железобетонной балки, усиленной в растянутой зоне (начало)



б – схема длительных испытаний, расположение тензометров (Т), индикаторов (И)

Рисунок 2. – Схема испытания опытной железобетонной балки, усиленной в растянутой зоне (окончание)

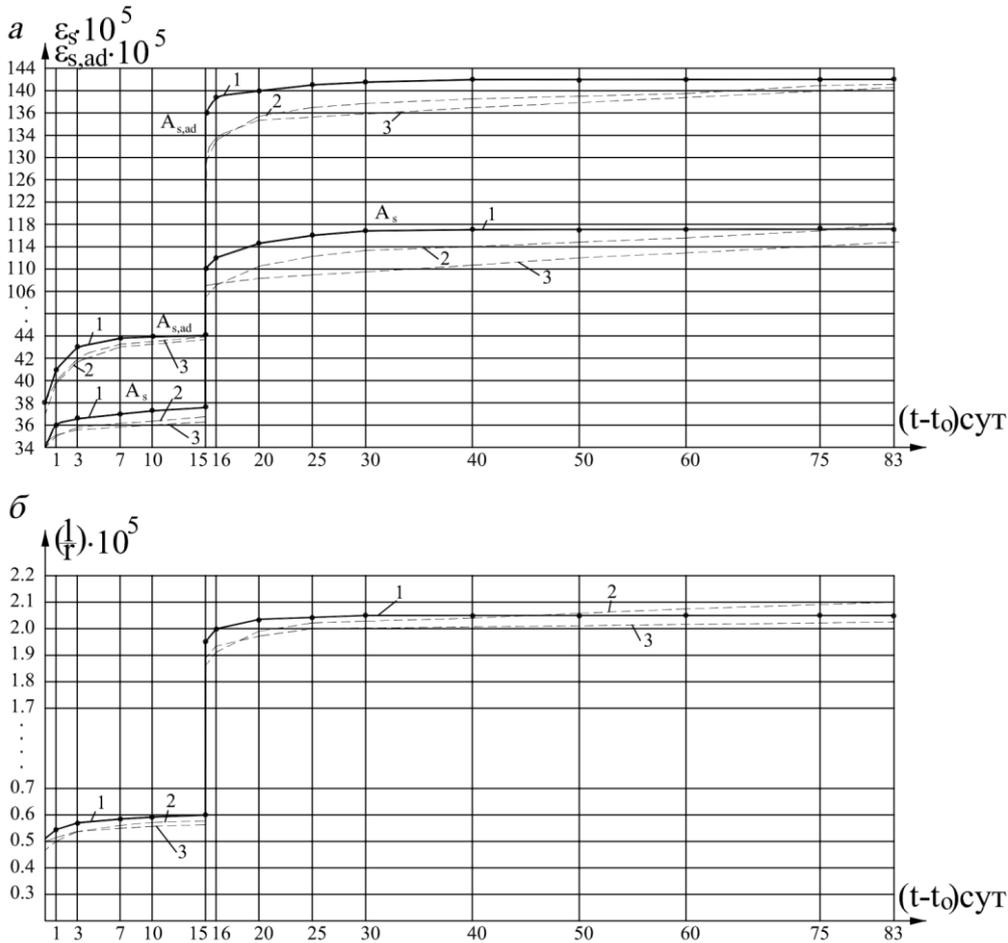


Рисунок 3. – Сопоставление при длительном нагружении балки опытных и расчетных значений: относительных деформаций основной и дополнительной арматуры (а); кривизны (б): 1 – опытные значения; 2 – расчетные по экспериментальным диаграммам; 3 – расчетные по расчетным диаграммам

**Заключение.** Общий метод расчета на основе деформационной расчетной модели поперечных сечений изгибаемых железобетонных элементов, усиленных в растянутой зоне, позволяет получить параметры их напряженно-деформированного состояния при длительном действии нагрузки.

Экспериментальная проверка методики расчета изгибаемых элементов, усиленных в растянутой зоне, при длительном приложении нагрузки показала удовлетворительную сходимость результатов расчета по опытным диаграммам-изохронам и расчетным в соответствии с действующим нормативным документом<sup>1</sup>.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лазовский, Д.Н. Общий метод расчета прочности и деформаций на основе нелинейной деформационной модели косо сжатых колонн, усиленных железобетонной обоймой / Д.Н. Лазовский, Д.О. Глухов, Е.Д. Лазовский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Стр-во. Прикладные науки. – 2021. – № 16. – С. 72–79.

<sup>1</sup> Бетонные и железобетонные конструкции : СП 5.03.01-2020. – Введ. 20.05.22. – Минск : М-во архитектуры и стр-ва Республики Беларусь, 2020. – 236 с.

2. Лазовский, Д.Н. Усиление железобетонных конструкций эксплуатируемых строительных сооружений / Д.Н. Лазовский. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т. – 1998. – 240 с.
3. Карпенко, Н.И. Исходные и трансформированные диаграммы деформирования бетона и арматуры / Н.И. Карпенко, Т.А. Мухамедиев, А.Н. Петров // Напряженно-деформированное состояние бетонных и железобетонных конструкций : сб. науч. тр. – М. : НИИЖБ, 1986. – С. 7–25.
4. Статически неопределимые железобетонные конструкции. Диаграммные методы автоматизированного расчета и проектирования : метод. пособие / Н.И. Карпенко [и др.]. – М. : М-во стр-ва и жилищно-коммунального хоз-ва Российской Федерации, 2017. – 197 с.
5. Учет ползучести и усадки бетона по СП 5.03.01-2020 при расчете железобетонных конструкций на основе деформационной расчетной модели / Д.Н. Лазовский [и др.] // Вестн. Брестского гос. техн. ун-та. – 2021. – № 2 (125). – С. 7–12.
6. Яшин, А.В. Методические рекомендации по определению основных механических характеристик бетонов при кратковременном и длительном нагружении / А.В. Яшин. – М. : НИИЖБ, 1984. – 52 с.
7. Александровский, С.В. Методические рекомендации по исследованию ползучести и усадки бетона / С.В. Александровский, В.В. Соломонов. – М. : НИИЖБ, 1975. – 118 с.
8. Бондаренко, В.М. Инженерные методы нелинейной теории железобетона / В.М. Бондаренко, С.В. Бондаренко. – М. : Стройиздат, 1982. – 287 с.
9. Макаренко, Л.П. Изменение физико-механических свойств бетонов при сжатии и растяжении при повторных нагружениях / Л.П. Макаренко // Бетон и железобетон. – 1989. – № 2. – С. 38–40.

## REFERENCES

1. Lazovskii, D.N., Glukhov, D.O. & Lazovskii, E.D. (2021). Obshchii metod rascheta prochnosti i deformatsii na osnove nelineinoi deformatsionnoi modeli koso szhatykh kolonn, usilennykh zhelezobetonnoi oboimoi [General method based on a nonlinear deformation model for strength and deformations analysis of eccentrically compressed concrete columns, strengthened with a reinforced concrete section enlargement]. *Vestn. Polots. gos. un-ta. Ser. F, Str-vo. Prikladnye nauki [Vestnik of Polotsk State University. Part F. Constructions. Applied Sciences]*, (16), 72–79. (In Russ., abstr. in Engl.).
2. Lazovskii, D.N. (1998). *Usilenie zhelezobetonnykh konstruksii ekspluatiruemykh stroitel'nykh sooruzhenii*. Novopolotsk: Polots. gos. un-t. (In Russ.).
3. Karpenko, N.I., Mukhamediev, T.A. & Petrov, A.N. (1986). *Iskhodnye i transformirovannye diagrammy deformirovaniya betona i armatury*. In *Napryazhenno-deformirovanное sostoyanie betonnykh i zhelezobetonnykh konstruksii*: sb. nauch. tr. (7–25). Moscow: NIIZhB. (In Russ.).
4. Karpenko, N.I., Travush, V.I., Karpenko, S.N., Petrov, A.N., Chepizubov, I.G., Eryshev, V.A., ... Yarin, L.I. (2017). *Staticheski neopredelimeye zhelezobetonnye konstruksii. Diagrammnye metody avtomatizirovannogo rascheta i proektirovaniya*. Moscow: M-vo str-va i zhilishchno-kommunal'nogo khoz-va Rossiiskoi Federatsii. (In Russ.).
5. Lazovskii, D.N., Tur, V.V., Glukhov, D.O. & Lazovskii, E.D. (2021). Uchet polzuchesti i usadki betona po SP 5.03.01-2020 pri raschete zhelezobetonnykh konstruksii na osnove deformatsionnoi raschetnoi modeli [Creep and shrinking of concrete accounting according to SP 5.03.01-2020 when analysis of reinforced concrete structures based on deformational analytical model]. *Vestn. Brestskogo gos. tekhn. un-ta [Vestnik of Brest State Technical University]*, (2), 7–12. (In Russ., abstr. in Engl.).
6. Yashin, A.V. (1984). *Metodicheskie rekomendatsii po opredeleniyu osnovnykh mekhanicheskikh kharakteristik betonov pri kratkovremennom i dlitel'nom nagruzhenii*. Moscow: NIIZhB. (In Russ.).
7. Aleksandrovskii, S.V. & Solomonov, V.V. (1975). *Metodicheskie rekomendatsii po issledovaniyu polzuchesti i usadki betona*. Moscow: NIIZhB. (In Russ.).
8. Bondarenko, V.M. & Bondarenko, S.V. (1982). *Inzhenernye metody nelineinoi teorii zhelezobetona*. Moscow: Stroiizdat. (In Russ.).
9. Makarenko, L.P. (1989). *Izmenenie fiziko-mekhanicheskikh svoystv betonov pri szhatii i rastyazhenii pri povtornykh nagruzheniyakh. Beton i zhelezobeton*, (2), 38–40. (In Russ.).

Поступила 04.05.2022

### MODELING OF THE BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE ELEMENTS, STRENGTHENED IN THE TENSIONED ZONE, UNDER THE ACTION OF A LONG-TERM LOAD

D. LAZOUSKI, D. GLUHAU, Y. LAZOUSKI

*This article provides suggestions for improving the method for analysis of the parameters of the stress-strain state of bent reinforced concrete elements, strengthened in the tension zone, taking into account the effects of concrete creep under a long-term load. The general non-linear deformation model for structural analysis of reinforced concrete elements under the combined action of bending moments and longitudinal forces is taken as a basis, using a mathematical description of the deformation diagrams of concrete and reinforcement. The proposed model makes it possible to take into account the effects of changes in deformations in concrete under the action of a long-term load. Experimental verification showed a satisfactory convergence of the results of the analysis by the proposed method with the experimental data.*

**Keywords:** reinforced concrete, strengthening, concrete creep, general nonlinear deformation model.

УДК 691.328.43:691.544

DOI 10.52928/2070-1683-2022-31-8-81-88

**СТОЙКОСТЬ БАЗАЛЬТОВОГО ФИБРОВОЛОКНА В ЩЕЛОЧНОЙ СРЕДЕ  
ГИДРАТИРУЮЩИХ ЦЕМЕНТНЫХ СИСТЕМ***канд. техн. наук, доц. И.П. ПАВЛОВА*  
ORCID <https://orcid.org/0000-0002-1996-2678>*К.Ю. БЕЛОМЕСОВА*  
(Брестский государственный технический университет)  
ORCID <https://orcid.org/0000-0003-4738-4585>

В статье представлены исследования, направленные на обоснование возможности применения базальтовой фибры в качестве дисперсного армирования в цементных системах на основе расширяющихся вяжущих с высокой энергией расширения (напрягающих цементов). Исследована щелочестойкость базальтовой фибры по ускоренной методике путем четырехчасовой выдержки в насыщенном растворе  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  при температуре  $t=95^\circ\text{C}$ , позволяющей смитировать процесс эксплуатации в течение 10 лет в среде цементного камня. Прочность на растяжение при изгибе цементных образцов с базальтовой фиброй, подвергнутой обработке по ускоренной методике, предложена как один из критериев оценки качества щелочестойкости фибры. Применение НЦ на основе портландцемента и расширяющейся добавки, состоящей из смеси высокоактивного метакаолина и природного гипса, позволяющего снизить pH среды со значений  $\approx 12,13$  до значений  $\approx 11,25$ , является альтернативным способом снижения щелочности гидратирующей среды как наиболее благоприятной для нахождения базальтового волокна. Проведен ряд экспериментальных исследований по определению прочностных показателей и собственных деформаций армированного базальтовым волокном напрягающего цемента. В ходе экспериментально-теоретических исследований выявлено, что базальтовое волокно обладает высокой щелочестойкостью. Введение базальтовой фибры в количестве 5% от массы вяжущего позволяет повысить прочность на сжатие НЦ на 35%, прочность на растяжение при изгибе на 68%, при этом собственные деформации соответствуют 0,22% свободного расширения и 2,74 МПа самонапряжения.

**Ключевые слова:** *напрягающий цемент, дисперсное армирование, базальтовое волокно, щелочестойкость, прочность на растяжение при изгибе, прочность на сжатие, собственные деформации.*

**Введение.** Высококачественные бетоны (англ. High-Performance Concrete – HPC), находящиеся на пике популярности в строительной отрасли, обладая рядом неоспоримых достоинств, в числе которых высокая прочность на сжатие, по-прежнему имеют низкую прочность при воздействии растягивающих усилий. Кроме того, таким бетонам свойственно хрупкое разрушение (практически полное отсутствие нисходящей ветви на диаграмме деформирования), а также повышенные значения деформаций усадки (главным образом, аутогенной), что обусловлено повышенным расходом цементной составляющей в силу специфики технологии получения данных бетонов [1]. Развивающиеся усадочные деформации впоследствии приводят к микротрещинообразованию композита и, как следствие, к снижению его эксплуатационных характеристик. Компенсировать негативные усадочные напряжения, а в ряде случаев создать деформации расширения возможно благодаря применению в качестве вяжущего цементных композитов расширяющегося цемента (напрягающего цемента). При этом, расширяющиеся вяжущие, направленные на борьбу с усадочными явлениями, зачастую не только не оказывают влияния на повышение прочностных показателей цементных композитов, а напротив, в случае применения расширяющихся цементов с высокой энергией расширения в силу специфики механизма расширения могут привести к некоторому разуплотнению структуры, что выражается спадами прочности. Для нивелирования эффекта разуплотнения из-за активного расширения в таких системах, особенно на ранних стадиях твердения, следует применять дисперсное армирование [2].

Модифицирование структуры цементных композитов волокнами различного рода позволяет получить композит с улучшенными характеристиками: высоким показателем сопротивления растягивающим и изгибающим нагрузкам, повышенной трещиностойкостью, сопротивлением усадочным деформациям (за счет создания пространственного каркаса и высокого сцепления волокна с цементной матрицей), повышенной водонепроницаемостью и морозостойкостью. Эффективность применения волокон определяется как свойствами: прочностью на растяжение, размерами волокна, стойкостью к щелочам, коррозионной стойкостью и плотностью, так и содержанием в композите. Наиболее распространенными и получившими практическое применение в строительной отрасли являются стальные, полипропиленовые и базальтовые волокна [4]. По ряду причин использование дисперсного армирования в массовом строительстве ограничено, в т.ч. из-за невысокой адгезии к цементному камню, недостаточной коррозионной стойкости и стойкости в щелочной среде гидратирующего цемента, стоимости, отсутствия нормативной базы и пр. [4; 5].

Базальтовое волокно может быть выделено как один из наиболее эффективных видов волокна, применяемого для модифицирования цементных композитов. Связано это, в первую очередь, с его природными свойствами, высокими прочностными показателями, а также высокой адгезией к цементному камню [4]. При этом, вопрос стойкости и в целом влияния на базальтовое волокно агрессивных сред, а именно щелочной среды гидратирующего цемента, до сих пор не имеет однозначного ответа, чем и вызывает ряд сомнений и, как следствие, отказ от применения

данного волокна в качестве армирующего компонента цементных систем. Неоднозначность полученных результатов исследований различных авторов связана с рядом факторов, в числе которых отсутствие единой методики при изучении данного вопроса, использование различного по химическому составу базальтового волокна, ограниченность во времени при проведении экспериментальных исследований и т.п.

Так, ранее проведенные С.Ф. Канаевым [3] исследования показали, что стойкость базальтового волокна и базальтопластиковой арматуры превосходит аналоги из стекловолокна.

Исследования стойкости минеральных волокон в растворе  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  группой ученых во главе с Ф.Н. Рабиновичем говорят о достаточно высокой степени разрушения минерального волокна в агрессивной среде. К примеру, алюмоборсиликатное моноволокно, выдержанное в течение 12 месяцев в насыщенном растворе извести, потеряло по их данным 72% своей исходной прочности. Однако исследователи отмечают довольно высокую стойкость базальтового волокна, прочность которого после выдержки в аналогичных условиях уменьшилась лишь на 26–32% [4]. Авторы также отмечают тенденцию к затуханию процессов реакции базальтовых волокон с  $\text{CaO}$  во времени. Наиболее интенсивно процессы выщелачивания наблюдаются в течение первых трех месяцев.

Группа авторов во главе с А.А. Пащенко в своих работах, также посвященных исследованиям стойкости минеральных волокон, утверждает о более высокой стойкости базальтовых волокон в агрессивных средах цементного камня и насыщенного раствора извести. Так, к примеру, после трехлетних испытаний базальтового волокна прочность его уменьшилась лишь на 12–15% [5].

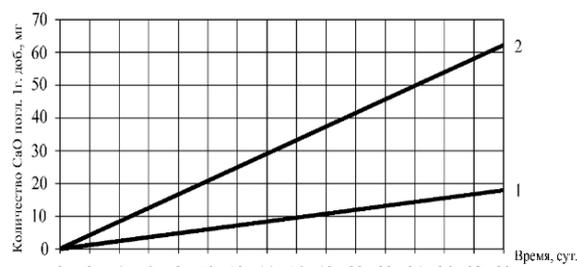
Оценка химической стойкости базальтового волокна производилась при кипячении в этом растворе  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  в течение 4 часов [6].

Результаты исследования по поглощению  $\text{CaO}$  представлены на рисунках 1 и 2.



1 – непрерывное базальтовое волокно;  
2 – базальтовая порода

Рисунок 1. – Активность базальтового волокна по отношению к  $\text{CaO}$  [6]



1 – непрерывное БВ 2800  $\text{cm}^2/\text{г}$ ;  
2 – базальтовая порода 3500  $\text{cm}^2/\text{г}$

Рисунок 2. – Активность базальтовых волокон по отношению к  $\text{CaO}$ , отнесенная к  $100 \text{ м}^2$  поверхности [6]

Как видно из рисунка 1, наибольшей активностью по отношению к  $\text{CaO}$  обладает базальтовая порода, несмотря на то, что удельная поверхность порошка, полученного из базальтовой породы, составляет  $8_{\text{уд}} = 2500 \text{ см}^2/\text{г}$ . Это говорит о большей реакционной способности базальта по отношению к  $\text{CaO}$  в сравнении с кварцевым песком. Данный факт подтверждается и при пересчете поглощения  $\text{CaO}$  на  $100 \text{ м}^2$  поверхности добавки. Поглощение  $\text{CaO}$  из насыщенного раствора извести базальтовым волокном составляет  $0,18 \text{ кг}/\text{м}^2$ , что говорит о его химическом взаимодействии с продуктами гидратации портландцемента.

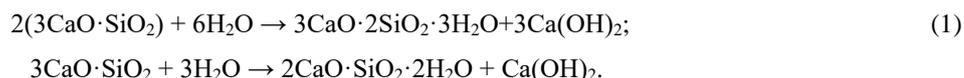
Таким образом, подтверждается, что базальтового волокно вступает в реакцию с продуктами гидратации портландцемента. Однако реакция протекает весьма ограниченно.

В.Б. Бабаевым [7] говорится о достаточно высокой степени разрушения, а в некоторых случаях вообще о практически полном растворении базальтовых волокон в щелочной среде цементных бетонов. При этом, напротив, группа исследователей во главе с И.В. Боровских<sup>1</sup> в своей работе отмечают незначительную потерю прочности волокна, находящегося в щелочной среде гидратирующего цемента и более того, дают заключение о том, что потеря прочности настолько мала, что никоим образом не влияет на прочность всего фиброармированного композита.

Необходимо отметить и тот факт, что в большем числе работ, посвященных исследованиям стойкости волокон, предложено оценивать эту характеристику по потере массы после обработки их в различных средах (щелочных, кислых и др.) при нагревании в течение определенного времени. Однако для волокна как конструкционного материала изменение массы является недостаточно информативной характеристикой его стойкости. Вследствие этого в качестве основного критерия оценки стойкости волокна в агрессивных средах предложено рассматривать косвенную характеристику – прочность при растяжении [8].

Как было отмечено ранее, вопрос стойкости базальтовых волокон возникает у исследователей при выборе того или иного вида волокна в качестве модифицирующего компонента именно цементных систем. Это напрямую связано со средой твердения данных систем, имеющей щелочной характер. В процессе твердения портландцемента в результате реакций гидролиза и гидратации клинкерных минералов жидкая фаза обогащается гидроксидом кальция  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , обретая при этом значение концентрации ионов водорода (рН), находящееся в пределах от 12,5 до 13,5. Базовые реакции гидратации представлены в формуле (1).

<sup>1</sup> Боровских, И.В. Высокопрочный тонкозернистый базальтофибробетон : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / И.В. Боровских. – Казань, 2009. – 168 л.



В итоге перед исследователями возникает задача, направленная на создание более благоприятных условий для нахождения базальтового волокна в цементных системах. Одним из эффективных вариантов решения данной задачи, по мнению большинства авторов<sup>2</sup> [7], является снижение щелочности среды (рН), в которой будет находиться базальтовое волокно. Достичь этого возможно как минимум двумя способами: введением добавок различной природы и дисперсности; выбором оптимального типа цемента.

Из всех известных способов понижения щелочности среды гидратирующих цементов на сегодняшний момент наиболее популярным является введение активной минеральной добавки – микрокремнезёма. На основании данных, полученных в ходе экспериментальных исследований, авторами<sup>3</sup> [7] установлено, что введение в цементную систему микрокремнезёма (в количестве 10%) приводит к снижению рН среды (со значений  $\approx 12,3$  до значений  $\approx 11,96$ ), что в свою очередь, по их мнению, ведет к созданию благоприятных условий для лучшей сохраняемости базальтового волокна.

В данной работе предложен альтернативный способ снижения щелочности гидратирующей среды с созданием более благоприятной среды для нахождения базальтового волокна, заключающийся в применении напрягающего цемента, представляющего собой композицию портландцемента и расширяющейся добавки, состоящей из смеси высокоактивного метакриолина и природного гипса, что в свою очередь позволяет снизить рН среды со значений  $\approx 12,13$  до значений  $\approx 11,25$ .

**Экспериментальные исследования. Сырьевые компоненты.** В качестве армирующего компонента напрягающего цемента использовали базальтовое волокно производства ООО «Каменный Век» (Россия, Московская область). Химический состав применяемого волокна, а также основные характеристики представлены в таблицах 1 и 2.

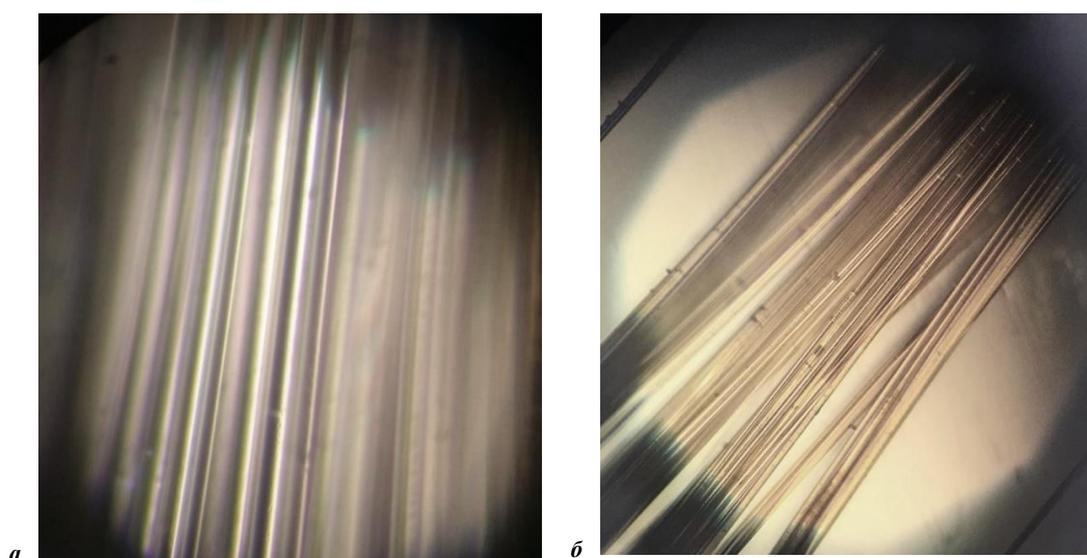
Таблица 1. – Химический состав базальтового волокна

Сырьевые материалы	Содержание оксидов, % по массе									
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	FeO	SO <sub>3</sub>	ппп
Базальт	48,1	15,9	8,8	5,3	3,7	1,7	3,4	6,7	0,2	–

Таблица 2. – Характеристики базальтового волокна

Параметр	Ед. изм.	Значение
Диаметр монофиламента (отдельного волокна)	мкм	16
Длина волокна	мм	25,4
Плотность волокна	г/см <sup>3</sup>	2,8
Температура плавления	°С	1450

На рисунке 3 представлена микрофотография базальтового волокна, сделанная при помощи цифрового комплекса «Альтами МЕТ 3С».



а – ув. 60х; б – ув. 20х

Рисунок 3. – Микрофотография базальтового волокна

<sup>2</sup> См. сноску 1.

<sup>3</sup> См. сноску 1.

На основании существующих многочисленных данных<sup>4</sup> [3–7] и результатов собственных исследований была принята дозировка базальтового волокна в количестве 5% от массы вяжущего.

Для экспериментальных исследований был использован состав напрягающего цемента, состоящий из портландцемента и сульфатоалюминатной расширяющейся добавки (РД). В качестве алюминатной составляющей РД, содержащей в своем составе от 40 до 50% оксида алюминия, был выбран высокоактивный метакаолин (ВМК). В качестве сульфатного компонента РД использован двуводный гипс (Г). Характеристики используемых материалов представлены в таблицах 3–5.

Таблица 3. – Химический состав цемента

Вид цемента	Содержание оксидов, %						
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	CaO св.
ЦЕМ I 42,5 Н	5,03	0,37	22,40	1,57	68,41	0,96	1,08

Таблица 4. – Химический состав метакаолина

Содержание основных оксидов метакаолина, в % по массе							
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	Na <sub>2</sub> O
54±0,05	43±0,05	0,6±0,05	следы	0,5±0,05	0,9±0,05	0,4±0,05	0,1±0,05

Таблица 5. – Химический состав гипса

Содержание основных оксидов гипса, в % по массе		
CaO	SO <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> O
32,57±0,05	46,50±0,05	20,93±0,05

Для определения степени влияния щелочных сред на прочностные характеристики волокна, а именно на его прочность при растяжении, в работе предложено использовать косвенную характеристику – прочность на растяжение при изгибе дисперсно-армированного базальтовым волокном цементного камня. Для моделирования длительного пребывания волокна в щелочной среде вяжущего, базальтовое волокно было подвергнуто предварительной выдержке в течение 4-х часов при температуре  $t = 95^{\circ}\text{C}$  в насыщенном растворе  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ( $\text{pH} = 12,58$ ), что эквивалентно 10 годам нахождения волокна в цементном композите согласно [5].

Для определения стойкости базальтового волокна в среде гидратирующего цемента по плану эксперимента, базальтовое волокно подвергли кипячению (при  $t = 95^{\circ}\text{C}$ ) в течение 4-х часов в следующих модельных средах: насыщенный раствор  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ( $\text{pH} = 12,58$ ); дистиллированная вода ( $\text{pH} = 6,32$ ). Определение значений концентрации ионов водорода ( $\text{pH}$ ) модельных сред проводили на стационарном  $\text{pH}$ -метре « $\text{pH}-211$ » производства HANNA Instruments. В целях исключения влияния термохимической обработки на прочность волокон замасливатели с их поверхности не удаляли.

В качестве контрольных образцов были заформованы образцы-призмы размерами  $40 \times 40 \times 160$  мм. Процент армирования образцов базальтовым волокном составил 5% по массе вяжущего. Для всех составов водовязущее отношение принято постоянным и равным  $\text{В/Вяз} = 0,35$ . В состав всех серий входила пластифицирующая добавка I группы на основе эфиров поликарбоксилатов.

Всего были заформованы три опытные серии:

- Напрягающий цемент (НЦ) с добавлением базальтового волокна, не подверженного кипячению (контрольная серия);
- НЦ с добавлением базальтового волокна, подверженного кипячению (при  $t = 95^{\circ}\text{C}$ ) в течение 4-х часов в насыщенном растворе  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .
- НЦ с добавлением базальтового волокна, подверженного кипячению (при  $t = 95^{\circ}\text{C}$ ) в течение 4-х часов в дистиллированной воде.

После формования опытные образцы выдерживались в течение 28 суток в нормально-влажностных условиях в соответствии с ГОСТ 310.4<sup>5</sup>, СТБ 1335<sup>6</sup>. Для определения прочности на растяжение при изгибе использовали гидравлический пресс CONTROLS AUTOMAX. Испытания опытных образцов проводили в возрасте 28 суток.

**Результаты экспериментальных исследований.** Средние значения прочности исследуемых образцов всех серий (А, Б, В), полученные в результате испытаний на растяжение при изгибе, приведены на диаграмме (рисунок 4).

Анализируя полученные данные, стоит отметить, что прочность образцов серий А (контрольная) и Б имеет равное значение и составляет 10,0 МПа, а значение прочности серии В лишь на 4% уступает значению этих серий (А, Б).

Как отмечалось ранее, значение прочности на растяжение при изгибе образцов, армированных базальтовым волокном, подверженным кипячению в насыщенном растворе  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , было предложено рассматривать в качестве косвенной характеристики значения прочности при растяжении базальтового волокна как армирующего компонента цементных систем.

<sup>4</sup> См. сноску 1.

<sup>5</sup> Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии : СТБ 310.4-81. – Введ. 01.07.83. – М. : Госстандарт Союза ССР, 1983. – 16 с.

<sup>6</sup> Цемент напрягающий. Технические условия : СТБ 1335-2002. – Введ. 01.01.03. – Минск : Минстройархитектуры, 2002. – 11 с.

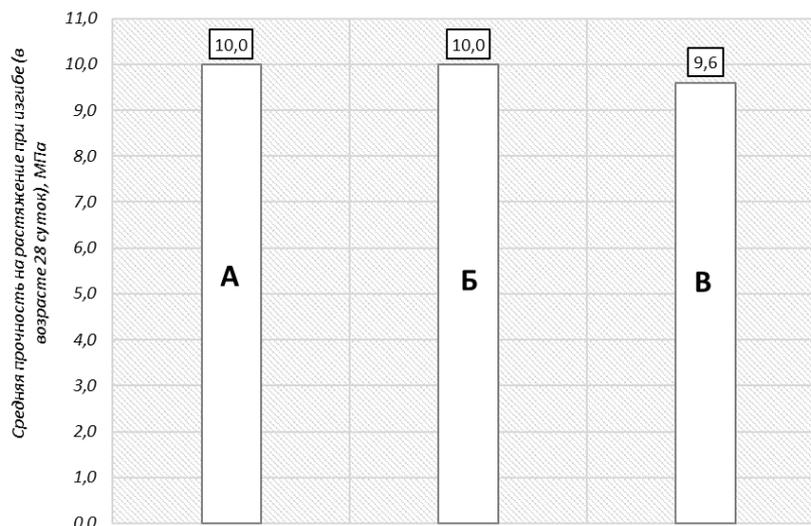


Рисунок 4. – Прочность на растяжение при изгибе в возрасте 28 суток образцов серий А, Б и В

Исходя из полученных данных (см. рисунок 4) можно сделать следующее заключение, что базальтовое волокно обладает высокой степенью стойкости к воздействию щелочной среды ( $\text{pH} \approx 11,25\text{--}12,58$ ) гидратирующего цемента и нахождение данного волокна в такого рода средах не влияет на его прочностные характеристики, а именно не снижает его прочность на растяжение.

Резюмируя вышеизложенное, необходимо отметить, что степень влияния щелочной среды на основные характеристики базальтового волокна во многом зависит от его вида (дискретное или непрерывное волокно). Связано это в том числе и с исходным качеством поверхности применяемого волокна, например, дискретное обладает более развитой поверхностью и наличием на ней нежелательных дефектов, таких как поры и микротрещины, что в свою очередь способствует быстрому протеканию процессов адсорбции агрессивной среды (щелочной, кислой и др.) и, как следствие, может привести к снижению прочности волокна в целом, а в некоторых случаях даже к его разрушению [5]. При этом, как было отмечено ранее, непрерывное волокно, используемое в данных исследованиях, обладает гладкой поверхностью, лишенной таких дефектов как микротрещины, поры, что хорошо заметно на микрофотографии данного волокна (см. рисунок 3).

В дополнение к проведенным исследованиям по определению прочности волокна и подтверждению вывода о стойкости базальтового волокна в щелочных средах были сделаны микрофотографии волокна, подверженного кипячению в насыщенном растворе  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (рисунок 5).

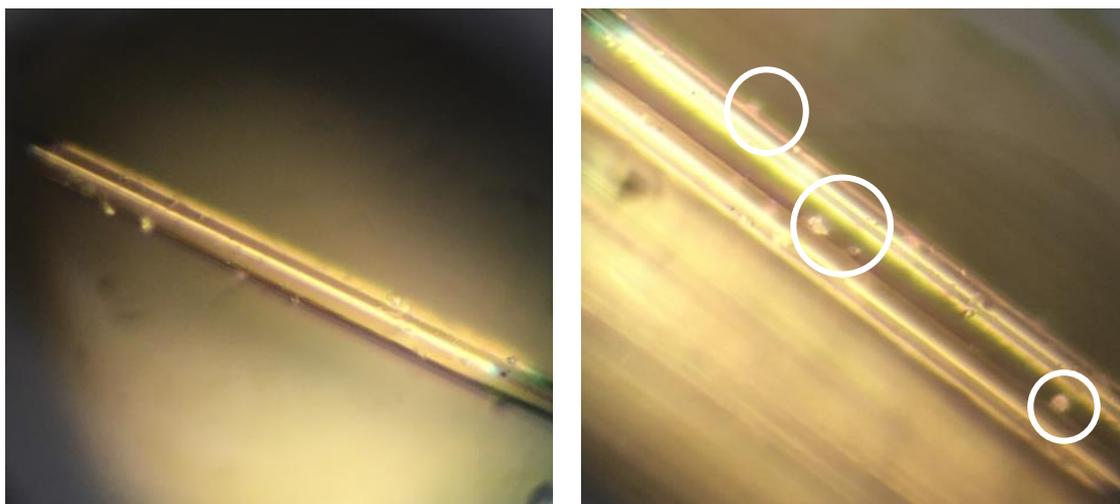


Рисунок 5. – Микрофотография базальтового волокна после 4-х часового кипячения в  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (ув. 80х)

На поверхности базальтовых волокон, подверженных длительному воздействию насыщенного раствора  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , отсутствуют такие дефекты как трещины, поры и сколы, но наблюдаются некоторые новообразования, протяженность которых незначительна и составляет около 2% от общей длины рассматриваемого фрагмента волокна.

Для анализа влияния «обработанных» по данной методике волокон на характеристики дисперсно-армированного напрягающего цемента были исследованы прочностные показатели и кинетика развития свободных и связанных деформаций расширения.

Для выявления влияния базальтового волокна на прочностные характеристики, а также величину свободных и связанных деформаций расширяющихся систем были заформованы 2 партии образцов: без армирования (контрольная) – НЦ; армированная базальтовым волокном – НЦФ. Прочностные характеристики определяли в соответствии с требованиями ГОСТ 310.4<sup>7</sup>. Определение величины собственных деформаций выполнено в соответствии с требованиями СТБ 1335<sup>8</sup>.

На рисунке 6 представлены зависимости изменения свободных и связанных деформаций исследуемых партий образцов во времени.

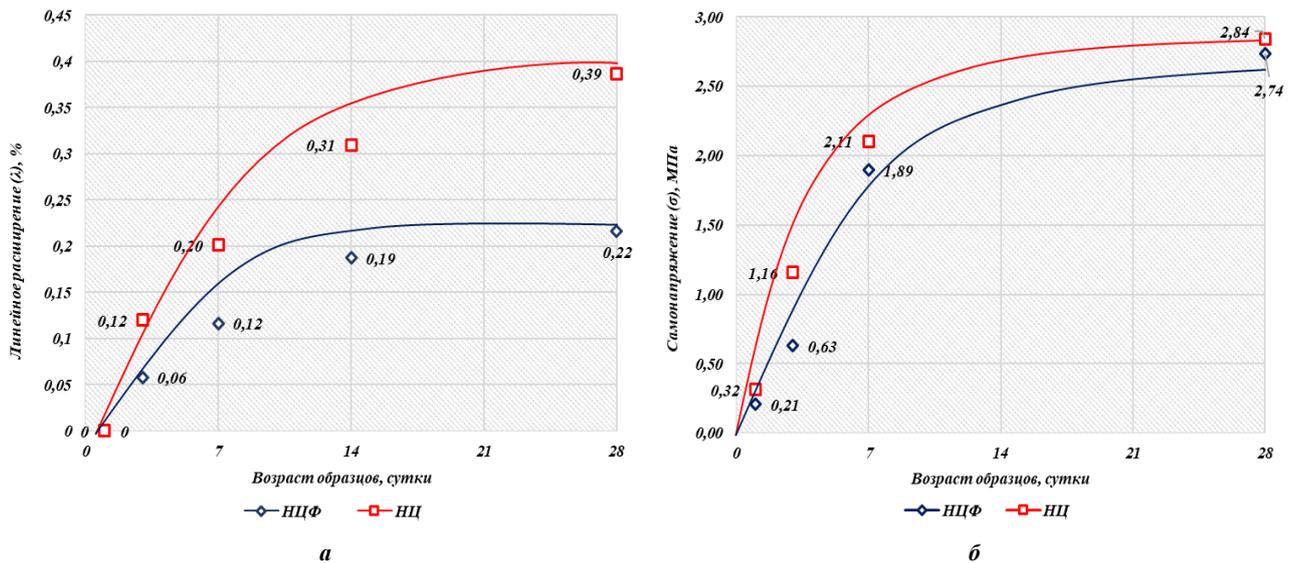


Рисунок 6. – Зависимость изменения свободных (а) и связанных (б) деформаций во времени образцов исследуемых партий (1, 2)

Как видно из рисунка 6, образцы партии 2 (НЦФ) как в случае свободных, так в случае связанных деформаций имеют значения ниже образцов партии 1 (НЦ), то есть базальтовое волокно ограничивает рост деформаций расширения. Это можно объяснить тем, что базальтовое волокно, обладая высокой адгезией к цементной матрице (в силу природы происхождения), разделяясь на монофиламенты и хаотично распределяясь в ней, формирует пространственный каркас определенной жесткости, что ограничивает перемещение составляющих расширяющейся цементной матрицы и приводит к возникновению самонапряжения даже в условиях т.н. свободного расширения.

Если сравнивать прочностные показатели исследуемых партий образцов (НЦ и НЦФ) (рисунок 7), то дисперсное армирование расширяющихся цементных систем даже «обработанным» базальтовым волокном наглядно демонстрирует возможности повышения сопротивления как растягивающим, так и сжимающим напряжениям.

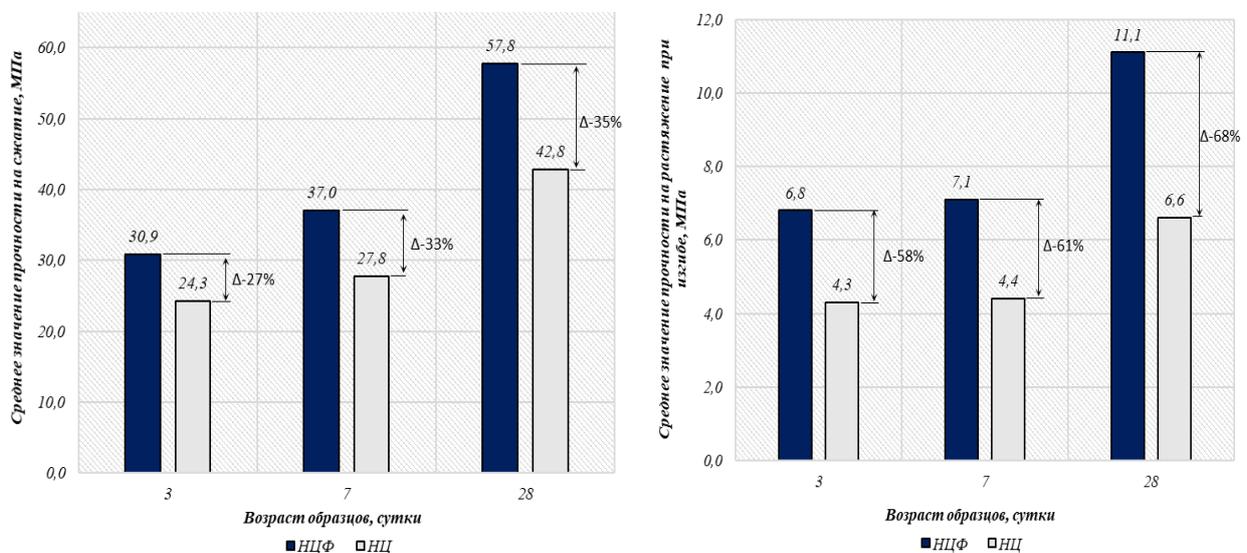


Рисунок 7. – Прочность на сжатие и растяжение при изгибе образцов исследуемых партий (НЦ, НЦФ)

<sup>7</sup> См. сноску 5.

<sup>8</sup> См. сноску 6.

Анализ полученных в ходе исследований данных позволяет с большой уверенностью говорить о целесообразности применения данного волокна в качестве армирующего компонента расширяющихся систем с высокой энергией расширения (см. рисунок 7).

Таким образом, комплекс проведенных исследований стойкости базальтовых волокон в щелочной среде, включающий микроскопический анализ и прямые испытания, свидетельствуют об эффективности применения базальтового волокна в качестве армирующего компонента расширяющихся цементных систем, в том числе с высокой энергией расширения.

**Заключение.** На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

1. Введение базальтового волокна в количестве 5% в активные составы приводит к ограничению собственных деформаций (свободное расширение снизилось на 43,6%, связанное – на 3,5%). При этом полученные значения расширения (0,22%) и самоупругения (2,74 МПа) по-прежнему соответствуют высокоактивному НЦ. Прочностные показатели для исследуемых образцов выросли соответственно на 35% (прочность на сжатие) и на 68% (прочность на растяжение при изгибе) (в возрасте 28 суток). Как следствие, применение дисперсного армирования в активных расширяющихся цементных системах дает возможность за счет эффекта внутреннего ограничения нивелировать эффекты разуплотнения, позволяя получать композит с высокими прочностными характеристиками;

2. Комплекс проведенных исследований показал высокую степень стойкости базальтовых волокон в щелочной среде гидратирующего цемента (спадов прочности у образцов, армированных «обработанным» базальтовым волокном, по сравнению с контрольными образцами не наблюдается, в следствие чего данное волокно может быть рекомендовано в качестве армирующего компонента расширяющихся цементных систем (напрягающего цемента);

3. Эффективным способом создания благоприятных условий, позволяющих сохранить прочностные характеристики базальтовой фибры в цементных композитах, является применение напрягающего цемента на основе расширяющейся добавки сульфоалюминатного типа ( $\text{pH} \approx 11,25$ ).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Тур, В.В. Экспериментально-теоретические основы предварительного напряжения конструкций при применении напрягающего бетона / В.В. Тур. – Брест : БПИ, 1998. – 244 с.
2. Павлова, И.П. Влияние вида дисперсного армирования на прочностные характеристики расширяющихся цементных вяжущих с высокой энергией расширения / И.П. Павлова, К.Ю. Беломесова // Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации : электрон. сб. ст. / Полоц. гос. ун-т ; редкол.: Д.Н. Лазовский (председ.) [и др.]. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2021. – С. 111–118.
3. Voylokov, I.A. Basalt fiber concrete. Historical excursion / I.A. Voylokov, S.F. Kanayev // Engineering and construction journal. – 2009. – № 4. – P. 26–31.
4. Рабинович, Ф.Н. Устойчивость базальтовых волокон в среде гидратирующихся цементов / Ф.Н. Рабинович, В.Н. Зуева, Л.В. Макеева // Стекло и керамика. – 2001. – Т. 74, № 12. – С. 29–32.
5. Армирование неорганических вяжущих веществ минеральными волокнами / А.А. Пашченко [и др.]. – М. : Стройиздат, 1988. – 201 с.
6. Бучкин, А.В. Цементные композиции повышенной коррозионной стойкости, армированные базальтовыми волокнами / А.В. Бучкин, В.Ф. Степанова // Строительные материалы. – 2006. – № 7. – С. 82–83.
7. К вопросу о щелочестойкости базальтовой фибры в цементной системе / В.Б. Бабаев [и др.] // Вестн. Белгородского гос. технол. ун-та им. В.Г. Шухова. – 2013. – № 2. – С. 63–66.
8. Левчук, Н.В. Физико-химические и технологические аспекты применения базальтовой фибры / Н.В. Левчук, Е.И. Шляхова // Вестн. Брестского гос. техн. ун-та. Сер. Стр-во и архитектура. – 2017. – № 1. – С. 135–138.

#### REFERENCES

1. Tur, V.V. (1998). *Eksperymental'no-teoreticheskie osnovy predvaritel'nogo napryazheniya konstruksii pri primenenii napryagayushchego betona*. Brest: BPI. (In Russ.).
2. Pavlova, I.P. & Belomesova, K.Yu. (2021). Vliyanie vida dispersnogo armirovaniya na prochnostnye kharakteristiki rasshiryayushchikhsya tsementnykh vyazhushchikh s vysokoi energiei rasshireniya [Influence of disperse reinforcement on the strength properties of expansive cement binders with high expansion energy]. In D.N. Lazovskii (Eds.) [et al.] *Arkhitekturno-stroitel'nyi kompleks: problemy, perspektivy, innovatsii*: elektron. sb. st. (111–118). Novopolotsk: Polots. gos. un-t. (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Voylokov, I.A. & Kanayev, S.F. (2009). Basalt fiber concrete. Historical excursion. *Engineering and construction journal*, (4), 26–31.
4. Rabinovich, F.N., Zueva, V.N. & Makeeva, L.V. (2001). Ustoichivost' bazal'tovykh volokon v srede gidratiruyushchikhsya tsementov. *Steklo i keramika [Glass and Ceramics]*, 74 (12), 29–32. (In Russ.).
5. Pashchenko, A.A., Serbin, V.P., Paslavskaya, A.P., Glukhovskii, V.V., Biryukovich, Yu.L., Solodovnik, A.B., ... Bem, Yu.O. (1988). *Armirovanie neorganicheskikh vyazhushchikh veshchestv mineral'nymi voloknami*. Moscow: Stroiizdat. (In Russ.).
6. Buchkin, A.V. & Stepanova, V.F. (2006). Tsementnye kompozitsii povyshennoi korrozionnoi stoikosti, armirovannye bazal'tovymi voloknami. *Stroitel'nye materialy [Construction Materials]*, (7), 82–83. (In Russ.).
7. Babaev, V.B., Strokova, V.V., Nelyubova, V.V. & Savgir, N.L. (2013). K voprosu o shchelochestoi kosti bazal'tovoi fibry v tsementnoi sisteme. *Vestn. Belgorodskogo gos. tekhnol. un-ta im. V.G. Shukhova [Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov]*, (2), 63–66. (In Russ.).
8. Levchuk, N.V. & Shlyakhova, E.I. (2017). Fiziko-khimicheskie i tekhnologicheskie aspekty primeneniya bazal'tovoi fibry [Physical and Chemical Technological Aspects of Fibre Application]. *Vestn. Brestskogo gos. tekhn. un-ta [Vestnik of Brest State Technical University]*, (1), 135–138. (In Russ., abstr. in Engl.).

Поступила 17.12.2021

**RESISTANCE OF BASALT FIBRE IN THE ALKALINE ENVIRONMENT  
OF HYDRATING CEMENT SYSTEMS****I. PAULAVA, K. BELAMESAVA**

*The paper presents studies aimed at substantiating the possibility of using basalt fiber as dispersed reinforcement in cement systems based on expanding binders with high energy of expansion (stressing cements). Alkalinity resistance of basalt fiber by the accelerated method by a four-hour exposure in a saturated solution of  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  at temperature  $t=95^\circ\text{C}$ , which allows simulating the operation process within 10 years in the environment of the cement stone, has been investigated. Tensile strength of cement samples with basalt fiber treated by the accelerated method has been proposed as one of the criteria for estimating the quality of alkali-resistant fiber. The application of NC on a Portland cement base and expanding additive consisting of a mixture of highly reactive metakaolin and natural gypsum allowing a decrease in pH of the medium from values  $\approx 12.13$  to  $\approx 11.25$  is an alternative way of reducing the alkalinity of hydrating medium as the most favorable for basalt fiber location. A number of experimental studies have been conducted to determine the strength properties and self-strains of basalt fiber-reinforced self-stressing cement. Experimental and theoretical studies have revealed that basalt fiber has high alkali resistance. The introduction of basalt fiber in an amount of 5% of the binder mass makes it possible to increase compressive strength of the SSC by 35%, tensile strength at bending by 68%, with self-strain corresponding to 0.22% of free expansion and 2.74 MPa of self-stressing, respectively.*

**Keywords:** *self-stressing cement, disperse reinforcement, basalt fibre, alkalinity, tensile strength, compressive strength, self-strain.*

УДК 72.06

DOI 10.52928/2070-1683-2022-31-8-89-95

## КЛАССИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТОВ АРХИТЕКТУРНО-ВИЗУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ И УСЛОВИЯ ИХ РАЗМЕЩЕНИЯ

*д-р архитектуры, проф. И.Г. МАЛКОВ, А.В. ТОЛОЧКО<sup>1</sup>*  
(Белорусский государственный университет транспорта, Гомель)  
<sup>1</sup>ORCID <https://orcid.org/0000-0002-6991-3794>

*В статье рассмотрены объекты насыщения города, которые несут в себе визуальную информацию для его жителей и туристов. Предложена классификация объектов визуальной информации с анализом их роли и мест размещения в городе. Классификация объектов приведена с учетом их функционального назначения, конструктивных особенностей, уровней размещения в городе, степени их индивидуализации. Приведены примеры таких объектов в городе Гомеле и выделены главные критерии современных объектов архитектурно-визуальной информации.*

**Ключевые слова:** визуальная информация, объекты информации, рекламные объекты, классификация информационно-объектов, городская среда.

**Введение.** Сейчас довольно сложно представить себе город с архитектурой и природой без какой-либо дополнительной визуальной информации. Современный человек постоянно нуждается в утолении своего информационного голода, именно поэтому крупные города имеют облик «рекламного журнала». И чем крупнее город, тем больше в нем объектов визуальной информации. А во многих случаях это даже переросло в определенного рода проблему. Ориентация в современном крупном городе с большой территорией, насыщенной различной инфраструктурой, выходит из-под контроля, то есть жителям бывает порой сложно определить наиболее привлекательные и полезные для посещения участки города.

Визуальная информация – это комплекс специальных указателей в виде информационных стендов, рекламных щитов, вывесок, которые помогают человеку ориентироваться в пространстве и узнавать новости благодаря той информации, которую они содержат. Понимание этой информации зависит от двух составляющих. Во-первых, это визуальный язык изображения (знаки, образы, символы), то есть то, что человек непосредственно видит. Во-вторых, это визуальное восприятие, то есть то, что влияет на понимание и обработку полученной информации. Например, реакция человека на городскую среду во многом зависит от самого человека, его жизненного опыта, настроения, с которым он вышел на улицу, времени суток, поры года и даже возраста. Главная задача визуальной коммуникации – объединить в себе цвета, письменный язык, образы, чтобы создать сообщения, которые будут эстетически приятны взгляду зрителя и наполнены понятной, необходимой информацией; будут обеспечивать ориентацию, утоление информационного интереса, а также регулировать поведение человека в конкретных предметно-пространственных ситуациях<sup>1</sup>.

Вокруг объектов визуальной информации располагается пространство, которое является своеобразным фоном, – это сам каркас и силуэт города. Этот фон играет немаловажную роль для восприятия и анализа информации, подобно странице в книге, на которой напечатан текст, или стене, на которой висят картины. От фона зависит многое, а зачастую он и сам несет в себе нечто важное и ценное. Объектом исследования и классификации в данной статье является то насыщение города, которое не нарушает его структуру, а лишь декорирует и дополняет городской фон.

Вопросы визуальной коммуникации в городской среде рассматривало с различных сторон большое количество авторов. Со стороны эстетики и проблем восприятия объектов и открытого пространства эту тему изучали М. Бархин, В. Глазычев, А. Иконников, К Линч и др. Организацию знаков и указателей рассматривали К. Бергер, Р. Пассини. Теоретик архитектуры и градостроительства К. Линч считает, что городская среда, должна быть очевидна и легка в распознавании, а архитектор Х. Херинг говорил, что у коммерческих зданий исчезает архитектурный фасад, он становится местом для рекламы. Я. Гейл рассматривает город как живой организм, где все со всем взаимодействует и друг на друга влияет, он глубоко понимает городские проблемы и предлагает подходы к улучшению качества жизни [2].

Однако необходимо отметить, что полная классификация объектов визуальной информации так нигде и не была дана, возможно отчасти потому, что развитие и изменение этих объектов идет непрерывно. Для того чтобы более детально разобраться в разновидностях объектов визуальной информации, а следовательно, более грамотно размещать эти объекты в городской среде необходима более четкая классификация, нежели просто по видам. Нами делается попытка дать предложение такой классификации.

**Основная часть.** С течением времени изменяются принципы формообразования и технологии реализации информационных носителей, но функции объектов остаются прежними, поэтому сначала разделим все объекты визуальной информации по их прямому функциональному назначению:

- визуальная информация утилитарно-практического назначения;
- рекламная информация;
- визуальная информация, отвечающая за безопасность граждан;
- визуальная информация художественно-рекреационного назначения.

<sup>1</sup> Гусакова, Л.И. Визуальные коммуникации. Элементы информативной экотуристической среды / Л.И. Гусакова // Гуманитарные научные исследования. – 2013. – № 5. [Электронный ресурс]. URL: <https://human.snauka.ru/2013/05/3119>.

Визуальная информация утилитарного назначения в городе играет самую важную роль для комфортного и понятного пребывания там людей, особенно туристов. Она формирует зоны жизнедеятельности людей. Знаки визуальной информации, различные указатели помогают людям легко ориентироваться в городской среде. Они структурируют маршруты, помогают найти нужный адрес, определить, как войти в здание, установить его функциональное назначение, получить информацию об услугах и т.д. А значит, такие знаки должны быть понятными и хорошо различимыми (рисунок 1)<sup>2</sup>.



Рисунок 1. – Вывеска на здании универмага в г. Гомеле

Все объекты визуальной информации утилитарного назначения можно классифицировать по их роли и значению для города. Мы делим их на три группы: стенды справочной информации, уличные указатели и средства пропаганды. Стенды справочной информации – это настенные или мобильные конструкции, имеющие карманы различных форматов, в которых размещается необходимая информация. Например, афишные установки, доски объявлений, информационные стенды и др. Наибольшее распространение вне помещений получили доски объявлений, они есть на каждом остановочном пункте, могут нести и рекламный характер. Уличные указатели представляют собой малоформатную конструкцию, изготавливаемую из пластика, металла, оргстекла, дерева. Например, номера домов, таблички с названиями улиц и площадей, карты-схемы, вывески и др. Без уличных указателей ориентация в городе будет крайне сложна, такими указателями наполнены не только крупные и малые города, но и сельские улочки. Средства пропаганды представляют информацию политического содержания. Это могут быть выставки наглядной агитации, доски почета, лозунги, флажки и др. Доски почета очень распространены в нашем городе и располагаются практически возле каждого крупного предприятия или организации.

Следующей большой группой объектов визуальной информации является наружная реклама. Впервые наружная реклама дала знать о себе еще тысячу лет назад, когда размещали различные конструкции в виде деревянных табличек, чтобы информировать людей об Олимпийских играх [5].

В XXI веке ни один бренд не может обойтись без рекламы. Наружная реклама, или «аутдор», представляет собой текстовую, графическую или иную визуальную информацию рекламного характера, размещаемую на открытом пространстве: на внешних стенах зданий, на специальных уличных установках, на автозаправочных станциях и иных элементах уличных конструкций. Задачей таких объектов является привлечение к себе внимания. Но зачастую политика рекламных компаний не совпадает с критериями гармоничной городской среды, и тогда реклама выходит на передний план, из-за чего городская среда теряет свою уникальность. Рекламную конструкцию стараются разместить так, чтобы ее увидело максимальное количество людей, учитывая разный угол обзора для пешеходов и водителей [4].

В городе Гомеле, как и в других городах нашей страны, наибольшую популярность получили рекламные вывески над небольшими магазинами в первых этажах крупных улиц. Примерами могут быть: ул. Советская, пр. Победы, пр. Ленина. Здесь приятно прогуливаться, рассматривать оформленные витрины. С каждым годом на этих улицах появляется все больше летних кафе. Эта реклама выглядит гармонично за счет того, что расположена в одном уровне, направлена в основном на пешеходов. На ул. Советская много зданий, которые являются памятниками архитектуры и создают ее визуальный облик, и данные рекламные вывески не перекрывают их собой. Вдоль

<sup>2</sup> Гаврюшкин, А.В. Информационно-ориентационные аспекты дизайна городской среды : автореф. дис. ... канд. архитектуры : 05.23.20 / А.В. Гаврюшкин ; Московский архитектурный институт. – М., 2010. – 27 с.

крупных дорог, соединяющих городские районы, и в местах с большим пространством можно видеть рекламные билборды. Такие конструкции заметны издали и могут нести абсолютно любую информацию, не только рекламного характера (рисунок 2) [6].



Рисунок 2. – Билборд на ул. Интернациональная в г. Гомеле

Еще одним распространенным местом для размещения рекламы в нашем городе являются фасады торговых центров. Эти фасады могут быть полностью заполнены всевозможными рекламными объектами. Такая реклама на новых торговых центрах выглядит вполне уместно.

Все объекты рекламной информации можно классифицировать по времени их размещения: стационарная и временная. Первый вид – это реклама, которая устанавливается на длительное время, а второй – на определенный промежуток времени, такие объекты часто бывают мобильными.

Наружная реклама уже прочно вошла в жизнь людей и является неотъемлемой частью антуража города. Теперь городской пейзаж является продуктом работы не только архитекторов, но и рекламщиков. Для удобства все объекты рекламной информации представлены в таблице 1.

Также визуальную информацию несут объекты, отвечающие за безопасность жителей города. Их можно разделить на три группы: дорожные знаки, знаки безопасности и сигнальная разметка. Дорожные знаки – техническое средство безопасности дорожного движения, имеющее стандартизированный графический рисунок, устанавливаемое у дороги для сообщения определенной информации участникам дорожного движения. Знаки безопасности – графическое изображение определенной геометрической формы с использованием сигнальных и контрастных цветов, графических символов, поясняющих надписей, предназначенное для предупреждения людей о непосредственной или возможной опасности, для обозначения мест нахождения средств противопожарной защиты, а также для разрешения или запрещения определенных действий. Сигнальная разметка – это цветное графическое изображение с использованием сигнальных и контрастных цветов, нанесенное на поверхности, конструкции, стены, перила, оборудование, машины, механизмы (или их элементы), ленты, цепи, столбики, стойки, заградительные барьеры, щиты и т.п. в целях обозначения опасности, а также для указания информации. Дизайн таких информационных объектов должен быть продуман до мелочей. От того, для чего нужен объект и как он будет использоваться, зависит его внешний вид. Такие объекты должны характеризоваться быстротой восприятия и реагирования потребителя на коммуникационные сигналы, подобно реакции водителя на знаки дорожного движения.

К последней группе объектов визуальной информации в городской среде, выполняющих художественно-рекреационную функцию, относятся всевозможные малые архитектурные формы, праздничные декорации, уличное освещение и др. Все то, что создает атмосферу и настроение города. Объектов, входящих в эту группу, огромное количество, и только по ним можно сделать собственную классификацию на целую статью.

Важным является то, что сегодня все вышеперечисленные группы объектов все теснее связываются между собой. Таким образом рождаются новые интересные варианты рекламно-утилитарно-художественных объектов. Например, брендированные скамейки в сквере, тентовые зонтики с рекламными надписями или указатели, несущие еще и декоративную функцию (рисунок 3) [1].

Таблица 1. – Классификация объектов рекламной информации

Тип		Наименование	Описание
Временные	Мобильные	Штендеры	Небольшие одно- или двусторонние выносные щиты, имеющие вид раскладного «домика». Работают одновременно как реклама и указатель
		Промостойки	Конструкции, представляющие собой тумбу со столешницей и выносной фриз с логотипом компании или любым рекламным изображением
	Закрепленные	Плакатные конструкции	Плакатные профили, помогающие привлечь внимание и информировать о деятельности компании, ее товарах и услугах
		Заборы из баннерного полотна	Способ размещения рекламной информации на носителях большой площади в местах проведения строительных и ремонтных работ
Стационарные	Отдельно стоящие	Рекламные щиты: билборды, бигборды, суперсайты и др.	Конструкции с использованием атмосфероустойчивых материалов, устанавливаемые на опорах
		Ситиформат: лайтборды, пиллары, скроллеры и др.	Представляют собой световые короба с рекламными поверхностями и внутренней подсветкой, или экранами
		Объемно-пространственные конструкции	Установки, изготовленные по индивидуальным проектам заказчика в виде аэростатов, воздушных шаров, объемных фигур и др.
		Стелы	Имеют металлический каркас, закрепленный на основании, и свободную площадь, где впоследствии размещаются блоки с рекламной информацией
	Размещаемые на строениях	Крышные установки	Такой формат наружной рекламы устанавливается на крыше и из-за этого имеет большой обзор
		Подвесные конструкции: вывески, кронштейны и др.	Располагаются на фасаде здания, у входа в заведение, офис или магазин. Содержат название организации, символ, рисунок
		Объемные буквы	Вид наружной рекламы из класса вывески. Имеет форму букв
		Перетяжки	Обычно крепятся к столбам или зданиям и располагаются над проезжей частью
		Маркизы	Солнцезащитные навесы, на которые наносится рисунок или текст
		Настенное полотно: баннеры, брендмауэры и др.	Вид наружной рекламы в виде полотна прямоугольной формы с изображением или текстом информационного или рекламного содержания, который устанавливается на стене, фасаде здания
	Витрины	Важнейшие средства наружной рекламы. Они могут быть оклеены специальной пленкой с рисунком либо оформлены с помощью товаров	



Рисунок 3. – Декоративный указатель направления разных городов в г. Гомеле

Все объекты визуальной информации, помимо их функционального назначения, можно классифицировать и по другим параметрам. По месту размещения их можно разделить на отдельно стоящие, размещаемые на строениях, транзитные и знаки на асфальте. Примеры отдельно стоящих объектов и конструкций, размещаемых на строениях, приведены в таблице 1. Помимо них, в качестве носителей информации часто используются транспортные средства. Такой транзитный способ информирования очень эффективен. Автомобиль оклеивается пленкой, на которой расположен логотип или другая продукция, информация. Такая реклама может наноситься как на общественный, так и на грузовой и легковой транспорт. Еще одним видом информирования в городе являются знаки на асфальте. Они к нам пришли более 20 лет назад и до сих пор активно используются. Яркие надписи, указатели и дорожки из стилизованных следов в местах большой проходимости людей отлично привлекают внимание и выполняют не только навигационную, но и рекламную функцию. Единственным минусом данного размещения информации является ежегодное, а то и еще более частое повторное нанесение из-за погодных условий и механического воздействия<sup>3</sup>.

Наиболее важным в эстетическом плане следует считать такой критерий классификации как степень индивидуализации объектов. К объектам индивидуального характера относятся рекламные установки, вывески фирменных предприятий, магазинов, ресторанов, кафе и др. Такие объекты отличаются индивидуальным дизайном, разнообразием форм. В их решении предполагается большая свобода выбора вариантов. Разработка типовых объектов, таких как дорожные знаки, номерные указатели и т.д., основывается на строгой оптимизации форм.

За годы использования объектов визуальной информации сложились определенные традиции их размещения, напрямую связанные с размерами этих объектов, которые позволяют классифицировать их по уровню расположения в городе. Можно выделить три уровня, описанных ниже.

1. Верхний. На зданиях устраиваются объекты, рассчитанные, в основном, на восприятие с дальних расстояний. Это – рекламные тексты, лозунги, информационные табло, вывески и др. Они имеют максимально большой визуальный охват.

2. Средний. Выбор вариантов этих установок напрямую связан с планировкой и организацией пространства, в котором они размещаются. Выбор места зависит как от назначения объектов, так и от условий их восприятия в пространстве. Это могут быть козырьки, вывески, рекламные буквы, кронштейны, знаки переходов, указатели у общественных зданий. В общем, это та информация, которую человек получает по пути своего движения, без целенаправленного длительного рассмотрения и изучения. Она легко бросается в глаза за счет своих размеров и уровня расположения.

3. Нижний. В центре города в местах постоянного движения людей для размещения информации, направленной именно на пешеходов, используются конструкции сити-формата. Сюда относятся всевозможные конструкции с элементами визуальной информации небольшого размера, направленные в первую очередь на пешеходов, которые хотят получить подробные, детальные сведения. Это могут быть стенды справочной информации, карты-схемы, доски объявлений на остановочных пунктах, установки со сменяемыми, развернутыми данными, такие как газетные стенды, выставочные экспозиции наглядной агитации, афишные установки и т.п. Они приближены к человеку в целях обеспечения лучшей видимости и располагаются в тротуарной зоне (рисунок 4).



Рисунок 4. – Многоуровневое расположение информации на здании в г. Гомеле

<sup>3</sup> См. сноску 2.

По типу исполнения объекты визуальной информации могут быть: плоские, объемные, текстовые, графические, светящиеся, движущиеся, интерактивные и др. На тип исполнения в первую очередь влияет место, где будет располагаться объект, и его функция. Рекламные щиты, панно, афиши и транспаранты могут размещаться на основных транспортных и пешеходных магистралях, площадях, спортивных аренах, ярмарках, выставках и в других местах большого скопления людей. Световые вывески, электронные табло и экраны, бегущие строки используют для рекламы различных товаров в вечернее время на центральных улицах и площадях, а также на зрелищных мероприятиях. Популярность в мире набирают проекционные системы – это специальное электронно-световое оборудование, позволяющее проецировать рекламу на большие поверхности в нескольких десятках метров от излучателя. В качестве поверхности обычно используется специальный щит или обыкновенная стена [3].

Сегодня, не зависимо от того, в каком уровне находится информационная конструкция, она должна иметь освещение. Это диктуется тенденцией к универсальности и возможности получения сведений в любое время суток. Но конечно же уровень освещения не может быть одинаковым в разное время года, а также в разных местах и районах города. Он должен регулироваться и оговариваться в соответствующих разрешениях. Например, чрезмерно яркая подсветка рекламной конструкции в спальном районе может мешать жителям, в то время как на центральных улицах такое освещение будет еще больше оживлять вечерний город. Практически все конструкции информационного характера разрабатываются с возможностью многоцветной смены этой самой информации. Можно переклеить плакат на билборде и пленку с рекламой на машине, поменять содержание витрины, а на электронных табло можно хоть бесконечно менять изображение. И это то, что актуально на сегодняшний день. Сменяемость должна быть быстрой, легкой и как можно менее материалозатратной. На наш взгляд, информационно-рекламные плакаты за 2–3 месяца уже теряют смысл восприятия, а значит смена должна происходить чаще. Размещение информации в городе не может иметь вседозволенность. Должно быть регулирование не только ее содержания, но и габаритов, цветового и светового решения, а также места размещения. По нашему мнению, ключевое слово по размещению растяжек, стел, билбордов и других архитектурно-визуальных объектов должно быть за главным архитектором, а задача дизайнеров – разработать такой макет, который будет максимально гармоничен в выбранном для этих целей месте.

**Заключение.** Для создания средств визуальной информации используют различные приемы и способы, а также заимствуют их из различных дисциплин: изобразительного искусства, дизайна, фотографии, современных компьютерных технологий и др. Немаловажным в формировании визуальной среды является взаимодействие всех ее элементов. Информация сегодня не просто помещается на поверхность, а обыгрывает конструкцию, ландшафт, функциональные особенности этого пространства. Информация наносится на элементы уличной среды, переходы, лестницы, технические люки, эскалаторы, урны, скамейки, турникеты, фонарные столбы, автобусные остановки, зеленые насаждения, афишные тумбы. Она придает обычным вещам новый смысл, а часто даже удивляет и шокирует людей воплощением дизайнерских идей.

Наше общество, жизнь и запросы людей стремительно меняются, а следовательно, меняется и составляющая визуальной информации. К представленной выше классификации со временем могут добавляться новые объекты, но сама структура этой классификации будет полезной как для архитекторов, так и для дизайнеров еще долгое время. Отвечая на вопросы: «Где? Для кого? Как долго?» и т.д., из классификации можно выбрать наиболее подходящий вариант объекта визуальной информации. Но важно помнить, что индивидуальность, легкая изменчивость и синергизм являются главными критериями в дизайне объектов визуальной информации на сегодняшний день.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Глазычев, В.Л. Урбанистика / В.Л. Глазычев. – М. : Европа, 2008. – 218 с.
2. Гейл, Я. Города для людей / Я. Гейл ; пер. с англ. – М. : Альпина Паблишер, 2012. – 276 с.
3. Костенко, А.Я. Средства информации в архитектуре / А.Я. Костенко. – Киев : Будівельник, 1984. – 112 с.
4. Добрицына, И.А. Средовые аспекты формирования систем визуальной коммуникации для города / И.А. Добрицына // Труды ВНИИТЭ. Сер. Техническая эстетика. – 1988. – № 57. – С. 75–92.
5. Белько, Т.В. Эволюция визуальных коммуникаций городской среды / Т.В. Белько // Известия Самарского научного центра РАН. – 2012. – Т. 14, № 2 (4). – С. 1053–1057.
6. Малков, И.Г. Архитектура Гомеля : моногр. / И.Г. Малков, И.И. Малков, А.В. Евстратенко. – Гомель : БелГУТ, 2021. – 176 с.

#### REFERENCES

1. Glazychev, V.L. (2008). *Urbanistika*. Moscow: Evropa. (In Russ.).
2. Geil, Ya. (2012). *Goroda dlya lyudei [Cities for people]*. Moscow: Al'pina Publisher. (In Russ.).
3. Kostenko, A.Ya. (1984). *Sredstva informatsii v arkhitekture*. Kiev: Budivelnik. (In Russ.).
4. Dobritsyna, I.A. (1988). Sredovye aspekty formirovaniya sistem vizual'noi kommunikatsii dlya goroda. *Trudy VNIITE. Ser. Tekhnicheskaya estetika*, (57), 75–92. (In Russ.).
5. Bel'ko, T.V. (2012). Evolyutsiya vizual'nykh kommunikatsii gorodskoi sredy [The evolution of visual communications of the urban environment]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN [Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]*, 14 (2), 1053–1057 (In Russ., abstr. in Engl.).
6. Malkov, I.G., Malkov, I.I. & Evstratenko, I.G. (2021). *Arkhitektura Gomelya*. Gomel: BelGUT. (In Russ.).

Поступила 21.04.2022

**CLASSIFICATION OF OBJECTS OF ARCHITECTURAL AND VISUAL INFORMATION  
AND CONDITIONS OF THEIR PLACEMENT*****I. MALKOV, A. TALOCHKA***

*The article considers the objects of saturation of the city, which carry visual information for its residents and tourists. A classification of objects of visual information with an analysis of their role and location in the city is proposed. The classification of objects is given taking into account their functional purpose, design features, levels of accommodation in the city, the degree of their individualization. Examples of such objects in the city of Gomel are given and the main criteria for modern objects of architectural and visual information are highlighted.*

**Keywords:** *visual information, information objects, advertising objects, classification of information objects, urban environment.*

УДК 711.55.01

DOI 10.52928/2070-1683-2022-31-8-96-101

**ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ –  
ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ТИПА**

*д-р архитектуры, проф. Е.Б. МОРОЗОВА*  
(Белорусский национальный технический университет, Минск)  
ORCID <http://orcid.org/0000-0002-2545-4792>

*В исторической ретроспективе рассматривается пространственная организация промышленного предприятия как типологической единицы в архитектуре. Исследуются приемы расстановки корпусов, структурно-функциональной и композиционной организации площадки, время их распространения, общие подходы к формированию пространства.*

**Ключевые слова:** архитектура промышленного предприятия, пространственная структура, модели организации производственного пространства.

**Введение.** В архитектурной теории промышленное предприятие является одной из основных типологических единиц, оно служит первоосновой, начальным «кирпичиком» формирования производственной инфраструктуры города. Промышленное предприятие относится к территориальным объектам и представляет собой обособленную площадку с размещенными производственными зданиями и сооружениями, причем площадку достаточно изолированную и дистанцированную во взаимосвязях с соседними функциональными зонами поселения. Подходы к пространственной организации промышленного предприятия претерпевали в историческом контексте определенные изменения, что позволяет выделить отдельные периоды таких трансформаций, установить их особенности, закономерности и тенденции<sup>1</sup>. Современное развитие промышленного проектирования, как и любого объекта архитектуры, не может не опираться на историческую динамику, что делает необходимым изучение пространственной организации промышленного предприятия во времени и пространстве.

**Основная часть.** Промышленная архитектура как самостоятельная область зодчества начала формироваться в 1710-х гг. Основным посылком стало внедрение машинного способа производства, в истории развития общества это связывают с первой промышленной революцией, пришедшей в западноевропейские страны и наиболее показательно проявившейся в Великобритании. Новый способ производства предполагал, во-первых, замену источника энергии – использование движущей силы воды в процессе получения продукта вместо мускульной силы человека или животных. Во-вторых, распространение нового способа производства обеспечили введенные в практику станки и устройства передачи энергии. При этом резко повышалась производительность труда и выпуск продукта, процесс становился серийным, разделяясь на ряд отдельных операций, которые можно было выполнять в массовом порядке, «поставить на поток». Все это привело к переосмыслению пространственной организации производственных помещений: если раньше они так или иначе рассчитывались на человека как главного участника процесса, то сейчас о себе заявила техническая составляющая – станки и механизмы, их габариты и условия функционирования. Это и определило потребность в новых постройках, пространственная организация которых учитывала сразу две системы – машины и человека<sup>2</sup>.

За короткое время, в течение 10–20 лет, появились совершенно новые для XVIII века типы производственных объектов – многоэтажные корпуса с внутренним каркасом и ярусной организацией пространства. Строения отличались своей необычностью: значительным количеством этажей (до восьми), одинаковостью решения каждого из них и свободным внутренним планом, не предусматривающим привычной для гражданского строительства анфиладной или коридорной структуры пространства. Такие здания возводили на берегах рек, обеспечивающих поступление энергии к станкам, а вокруг этих зданий формировались поселения нового типа – промышленные деревни. Многоэтажные корпуса представляли первый тип объемных объектов промышленной архитектуры, поселения – первый тип территориальных объектов<sup>3</sup>. Промышленного предприятия в архитектурной типологии пока еще не было.

Оно возникло в 1770–1780-х гг. как обособленная площадка с производственными строениями, взаимосвязанными технологическим процессом, имеющими определенные морфологические характеристики и своей расстановкой структурно формирующими пространство. До этого времени, первые 50–60 лет развития промышленной архитектуры, предприятие существовало как организационная форма – раздробленность технологических операций и невозможность их всех «машинизировать» обуславливали размещение только некоторые из них в новых фабричных корпусах, остальные выполнялись кустарным способом и потому часто в домашних условиях как подряд [1; 2, с. 47].

Развитие техники и технологий привело к собиранию всех производственных операций на одной площадке, разработке и возведению специальных зданий для них. Это и определило формирование промышленного пред-

<sup>1</sup> Морозова, Е.Б. Промышленная архитектура: исторические закономерности и тенденции развития : дис. ... д-ра архитектуры : 18.00.05 / Е.Б. Морозова ; Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2008. – 368 л.

<sup>2</sup> См. сноску 1.

<sup>3</sup> См. сноску 1.

приятия не только организационно, но и пространственно. Опережающими темпами процесс шел в Великобритании, Германии и России<sup>4</sup>. К началу XIX века сложились три разновидности пространственной организации предприятия, которые были достаточно универсальны для всех стран.

Первой и наиболее распространенной являлась периметральная застройка, обеспечивающая своеобразное огораживание площадки со всех сторон производственными корпусами и прочими строениями. Внутри территории перемещение предполагало закольцованные схемы с выходом ко внешним магистралям один или два раза. Застройка выглядела очень неоднородно, всегда можно было выделить один-два доминирующих, как правило, многоэтажных корпуса, их расположение определялось не столько окружением предприятия, сколько ориентацией по сторонам света, обеспечивающей наиболее эффективное естественное освещение – длинные стороны зданий с наибольшим количеством окон обращали на север. Отсутствие необходимости как-то увязывать расположение главных корпусов с близлежащими улицами объяснялось тем, что промышленные предприятия в это время строились в сельской местности и были родоначальниками поселений, поэтому не фабрика встраивалась в поселение, а оно росло вокруг нее. Прием периметральной застройки распространился в разных отраслях промышленности (текстильная фабрика Бин Инг Парк в Лидсе, Великобритания, 1792–1803 гг.) [1; 2, с. 27, 35] (рисунок 1).

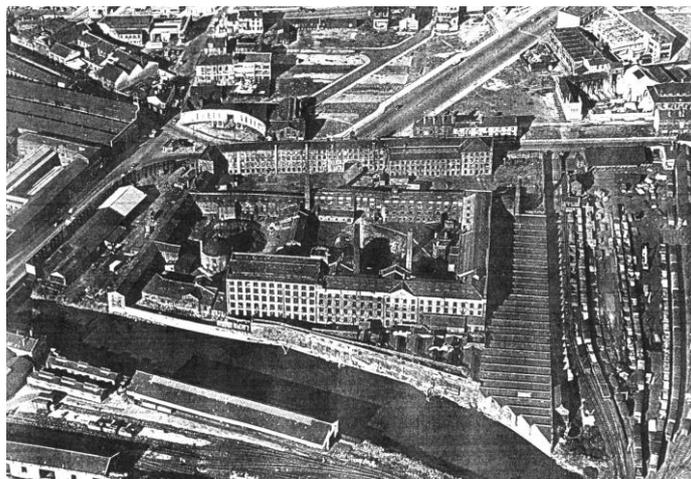


Рисунок 1. – Текстильная фабрика Бин Инг Парк в Лидсе, Великобритания

Второй прием – открытая застройка – предполагал расстановку корпусов по одной или двум направляющим, параллельным друг другу или близким к этому. Внутренние проезды также замыкались, вся их система подключалась к внешним дорогам во многих точках и достаточно свободно. Использование специального огораживания (забора) и естественных границ участка (берегов водоемов) обеспечивали физическую обособленность предприятия. Визуальной целостности способствовала строго выдерживаемая система параллельной расстановки корпусов. Прием сложился и получил преимущественное развитие на металлургических заводах, чему способствовала специфика использования здесь водяной энергии – производственные здания располагались последовательно в зависимости от их энергоемкости вдоль водоводных устройств, в дальнейшем такая расстановка корпусов сохранилась и при переходе производства на паровую энергию (предприятие Стим Энджин в Нью-Джерси, США, 1820–1838 гг.) [3] (рисунок 2).

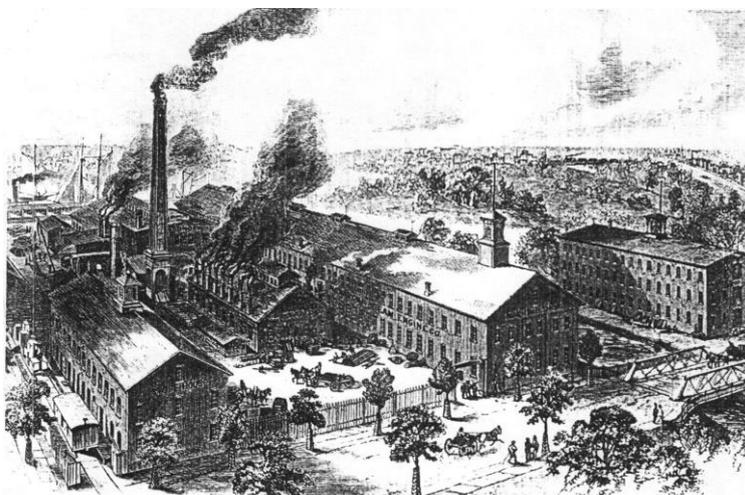


Рисунок 2. – Предприятие Стим Энджин в Нью-Джерси, США

<sup>4</sup> См. сноску 1.

Комбинированная застройка, как объединение принципов первых двух приемов, стала третьей в пространственной организации предприятия. Она применялась в разных отраслях и была достаточно распространена при размещении предприятий на периферии города (фабрика Чикеринг-Сан в Бостоне, США) [4, с. 16] (рисунок 3).

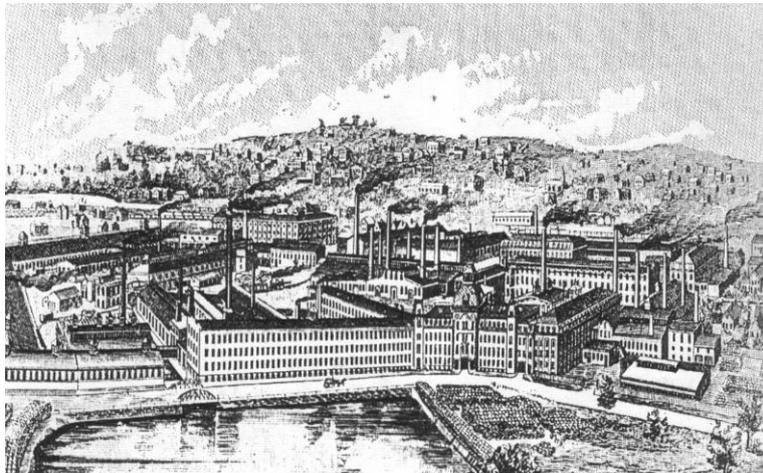


Рисунок 3. – Фабрика Чикеринг-Сан в Бостоне, США

При всех приемах пространственной организации предприятия размещение строений для управленческой функции имело общий подход – как правило, в отдельно стоящем объеме в центре площадки (Сохо Мануфэктори в Бирмингеме, Великобритания, 1764–1766 гг.) [4].

В период с начала XIX и до начала XX века предприятия разных отраслей промышленности продолжали использовать в своей пространственной организации приведенные выше приемы (США – Мануфэктори Компани в Филадельфии, 1880 г.; Баджен Айрон Компани в Ловелле, 1881 г.) [5, с. 66, 69, 76]. Некоторые изменения коснулись следующего. Площадки предприятий стали больше и процесс наращивания их размеров активно продолжался, повсеместно стали использовать зонирование территории, что способствовало ее технологическому и пространственному упорядочению. В пространственную структуру была введена регулярность застройки, которую обеспечивала параллельность планировочных осей корпусов и их частичное или полное совпадение. На участке по-прежнему сохранялась диверсификация корпусов по функциональной и композиционной значимости, однако число доминирующих объемов выросло и не ограничивалось как ранее одним-двумя корпусами. В зданиях управленческих функций расширилась номенклатура помещений, добавились чертежные, проектные залы для работы с технической документацией, а в конце XIX века – маркетинговые службы, которые повлияли на размещение административных корпусов: их стали выдвигать из глубины площадки к внешним границам, городским улицам, уделять большее внимание разработке фасадов [5, с. 33–35]. В 1890-е гг. на некоторых предприятиях в США появились помещения, предназначенные для санитарно-бытового обслуживания рабочих. Однако они не формировали отдельного объема и размещались в производственных цехах (заводы в США – В. Бементы в Филадельфии, 1884–1886 гг.; Дин Бразас в Индианаполисе, 1862–1864 гг.) [4, с. 47; 6, с. 69].

К трем существующим приемам организации промышленной территории добавился новый – модульная застройка. Она сложилась в результате использования стандартных корпусов на базе открытой застройки, здания размещали на площадке по регулярной системе, параллельно друг другу. Генеральные планы промышленных предприятий, собранных из таких стандартных зданий, получили общее название «модульный план» (англ. – unit system plan) (предприятие Эстей Орган в Браттлборо, 1900 г., США)<sup>5</sup> (рисунок 4).

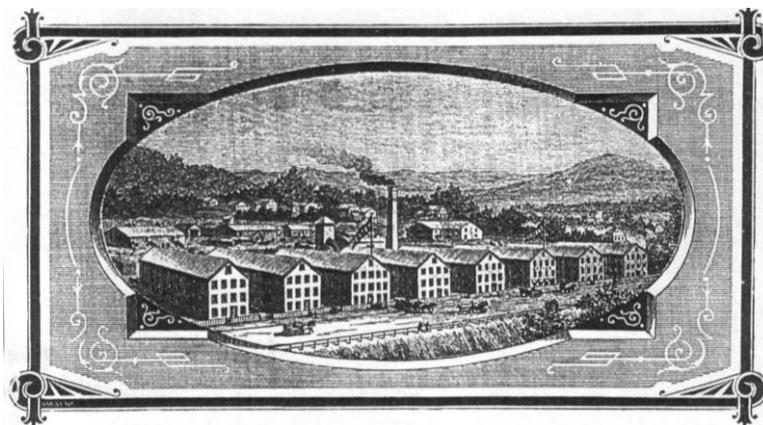
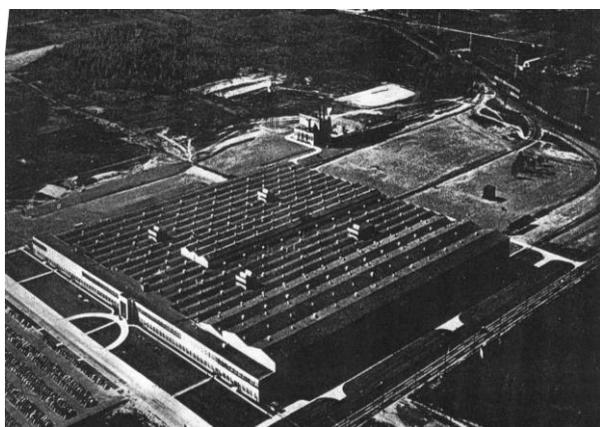


Рисунок 4. – Предприятие Эстей Орган в Браттлборо, США

<sup>5</sup> Производственные здания // Музей и библиотека Эстей Органс. – Фонд компании J.Estey&Organs. – Оп. 3.

XX век явился временем наиболее активного развития промышленной архитектуры, чьи постройки стали неотъемлемой частью городской среды. При этом предприятия могли формировать группы и тем самым оккупировать большие территории – промышленные районы, принимавшие разные формы и ставшие новым типом территориальных объектов архитектуры и градостроительства. Именно в это время существовавшие почти 200 лет универсальные приемы пространственной организации предприятия стали уходить из практики. Застройка предприятия была поставлена в жесткую зависимость от технологии, и к 1940-м гг. в каждой отрасли промышленности сложились однозначные схемы расстановки корпусов, правила формирования генерального плана площадки<sup>6</sup>. Это было во многом обусловлено возросшим влиянием двух образующих форму и пространство факторов – организации труда и организации производственного процесса.

Во второй половине XX века появился еще один, новый прием пространственной организации предприятия, который единственный сохранял универсальность, однако не для всех отраслей промышленности. Это была застройка, получившая название корпус-завод. Впервые прием был разработан в США и СССР (в том числе в БССР) и представлял собой одно здание на площадке, объединявшее все технологические операции и вспомогательные службы. Такая пространственная организация площадки являлась своего рода недостижимой «мечтой» промышленника – собрать весь процесс под одну крышу. В 1970-х–1980-х гг. это удалось для предприятий машиностроительной, станкостроительной и некоторых отраслей легкой промышленности (рисунок 5).



*a* – автомобильный завод Джeneral Моторс, США;

*б* – заводы Минлегпищемаша в Бресте, Беларусь

**Рисунок 5. – Корпус-завод**

В Беларуси времен СССР так были построены заводы Минлегпищемаша в Бресте, легких металлических конструкций в Молодечно, «Автогидроусилитель» в Борисове, научно-производственное объединение «Центр» в Минске. Однако сложность формирования предприятия в виде единого корпуса не позволила распространиться этому приему, в настоящее время он встречается крайне редко.

XX век продемонстрировал зависимость пространственной организации предприятия не только от технологического процесса, но и от градостроительного положения, этот фактор долгое время не учитывался в промышленном проектировании. Особенно наглядно иллюстрировала учет градостроительного положения советская практика. Здесь, в соответствии с идеологией приоритетного положения в обществе пролетариата как правящего класса, промышленные предприятия размещали на главных улицах и площадях, выдвигая главные корпуса и проходные, административные службы к лицевым сторонам площадки. Показательным примером может служить проспект Независимости в Минске, где разместились три приборостроительных предприятия, один механический завод и две типографии, застройка которых активно участвовала и продолжает формировать эту главную магистраль города. Например, в ансамбле площади Я. Коласа и по сегодняшний день ведущую роль играет комплекс предприятий, возведенных в 1940–1950-х гг. (рисунок 6).

В своем историческом развитии пространственная структура промышленного предприятия может рассматриваться не только с точки зрения расстановки и взаимосвязи объемов на площадке и их морфологии, но и с точки зрения теоретических обоснований самого устройства пространства – пространственных моделей. Таких моделей было две<sup>7</sup>.

Первая, изоляционная модель, сложилась сразу же и определяла ориентацию на внутреннюю организацию всех процессов, автономность и закрытость предприятия от внешней среды. Без этого производственный объект любой отрасли просто не мог функционировать, поскольку требовалось обеспечение сохранности его материальных фондов, продукции и сырья. Перенесение строительства предприятий из сельской местности в города, которое началось в XIX веке с введением паровой энергии, только усилило материализацию этой модели – от закрытости, обособленности до полной пространственной изоляции предприятия. Изоляционная модель остается преоблада-

<sup>6</sup> См. сноску 1.

<sup>7</sup> См. сноску 1.

ющей и сегодня, хотя недостатки ее очевидны – городская ткань разрывается крупными территориальными образованиями промышленного профиля, нарушаются всевозможные связи сопредельных территорий, их транспарентность, возможность взаимообусловленного развития.



*а* – 1950-е гг.;



*б* – настоящее время

**Рисунок 6. – Комплекс предприятий на пл. Я. Коласа в Минске, Беларусь**

Попытки преодолеть эти недостатки начались с 1970-х гг. В отечественной практике, где предприятия включали в свою структуру более широкий, по сравнению с зарубежным строительством, круг объектов обслуживания работающих, это привело к вынесению таких функций к внешним границам заводов, формированию контактно-стыковых зон между производственной и жилой застройкой. Кроме того, старались внешний периметр предприятия обозначить зданиями, а не ограждением, особенно по сторонам, выходящим на жилые улицы и главные магистрали города. В зарубежной практике изоляцию предприятия преодолевали с помощью использования технических средств слежения. Главные корпуса предприятия делали доступными для посетителей, насыщая их рядом общественных служб, при этом блокируя доступ в производственные зоны (в Германии – завод электротехнического концерна «Миро»; «стеклянная мануфактура» концерна «Фольксваген» во Франкфурте). Наиболее продвинулась эта идея на заводе Брауна в Мелсунгене (Германия, 1986 г.), где всю промышленную территорию удалось сделать свободной для посещения, закрывая корпуса и службы предприятия с помощью системы электронной идентификации (рисунок 7). Такая система является дорогостоящей, и это делает ее применение достаточно ограниченным в современной практике промышленного строительства.



**Рисунок 7. – Завод Брауна в Мелсунгене, Германия**

Тем не менее, опыт включения предприятия в общую систему городских территорий, стремление преодолеть их обособленность и автономное существование в городской ткани отразили новую модель устройства промышленного пространства – конвергентную, при которой предприятие становится открытым во внешнюю среду, все его составляющие имеют визуальные, транспортно-пешеходные и прочие связи не только между собой и в рамках производственных границ, но и за их пределами. Сегодня общемировая практика промышленного строительства ориентирована на разработку приемов реализации конвергентной модели, хотя успехов на этом пути пока еще немного.

**Заключение.** Подводя итог ретроспективе развития пространственной организации промышленного предприятия можно заключить, что эта сфера проектирования имеет свой исторический дискурс. Приемы расстановки корпусов, организации генерального плана предприятия, подходы к его пространственному устройству претерпевали определенную трансформацию во времени. Исследование этих процессов и их учет в реальной современной практике обуславливают как преюбельность при дальнейшей разработке пространственной структуры промышленных предприятий, так и поиск новых путей реализации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Морозова, Е.Б. От промышленного поселения до технопарка: территориальные объекты промышленной архитектуры / Е.Б. Морозова. – Минск : БНТУ, 2014. – 208 с.
2. Jones, E. *Industrial architecture in Britain: 1750–1939* / J. Edgar. – New York : Facts on File, 1985. – 239 p.
3. Лотарева, Р.М. Города-заводы России: XVIII – первая половина XIX века / Р.М. Лотарева. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 1993. – 216 с.
4. Giles, C. *Yorkshire textile mills: the buildings of the Yorkshire textile industry, 1770–1930* / C. Giles, I.H. Goodall. – London : HMSO, 1992. – 274 p.
5. Bradley, B.H. *The Works: the industrial architecture of the United States* / B.H. Bradley. – New York : Oxford University Press, 1999. – 347 p.
6. Biggs, L. *The Rational Factory: architecture, technology, and work in America's age of mass production* / L. Biggs. – Baltimore : Johns Hopkins University Press, 1996. – 202 p.

## REFERENCES

1. Morozova, E.B. (2014). *Ot promyshlennogo poseleniya do tekhnoparka: territorialnye ob'ekty promyshlennoi arkhitektury*. Minsk: BNTU. (In Russ.).
2. Jones, E. (1985). *Industrial architecture in Britain: 1750–1939*. New York: Facts on File.
3. Lotareva, R.M. (1993). *Goroda-zavody Rossii: XVIII – pervaya polovina XIX veka*. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta. (In Russ.).
4. Giles, C. & Goodall, I.H. (1992). *Yorkshire textile mills: the buildings of the Yorkshire textile industry, 1770–1930*. London: HMSO.
5. Bradley, B.H. (1999). *The Works: the industrial architecture of the United States*. New York: Oxford University Press.
6. Biggs, L. (1996). *The Rational Factory: architecture, technology, and work in America's age of mass production*. Baltimore: Johns Hopkins University Press.

Поступила 08.03.2022

**SPATIAL ORGANIZATION OF AN INDUSTRIAL ENTERPRISE –  
THE HISTORY OF TYPE DEVELOPMENT**

**Y. MOROZOVA**

*In historical retrospect there is examined the spatial organization of an industrial enterprise as a typological unit in architecture. The techniques of the placement of buildings, structural-functional and compositional organization of the site, the time of their distribution, general approaches to the space formation are given.*

**Keywords:** *architecture of an industrial enterprise, spatial structure, models of the organization of the production space.*

УДК 347.787+904(476)

DOI 10.52928/2070-1683-2022-31-8-102-111

## НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВТОРОГО ЭТАЖА ЗДАНИЯ БЫВШЕГО «ГРАНД ОТЕЛЯ» ПО ПРОСПЕКТУ Ф. СКОРИНЫ, Д. № 5 В Г. ПОЛОЦКЕ

А.А. СОЛОВЬЁВ

(Национальный Полоцкий историко-культурный музей-заповедник)

В статье приводятся итоги натурного исследования второго этажа здания бывшего «Гранд Отеля». Зондажи стен выявили ряд одновременных перестроек здания и позволили уточнить его первоначальную планировку. Наиболее масштабные перестройки в здании, которые привели к полной утрате всех элементов его первоначальных интерьеров, произошли в 1874, 1912 и 1971 гг.

При исследованиях кладок существующего здания в составе изучаемого этажа выявлен фрагмент стены более раннего сооружения XVIII в., про которое не имеется никаких сведений. Очертания кирпичной постройки в западной части изучаемого нами объекта известны только по планам Полоцка конца XVIII в., но ее назначение и характер архитектуры не указаны. В ходе работ был расчищен ряд архитектурных элементов восточного фасада этого здания – остатки окон и карнизов. Было выяснено, что при строительстве в середине XIX в. восточной части «Гранд Отеля» на уровне второго этажа данная постройка была соединена с выявленным нами зданием XVIII в., к тому времени уже порядком перестроенным через два арочных проема. Это говорило о том, что оба здания некоторое время имели одного владельца, но вскоре их разделили, полностью изолировав друг от друга.

Вновь постройки соединили только после 1912 г., устроив новый проход, и применили для подъезда и туалетов в качестве перекрытий своды на рельсах.

**Ключевые слова:** «Гранд Отель», зондажи, натурные исследования, кирпичные своды по рельсам, «люфт-клозет», пожар 1912 г.

**Введение.** Изучаемое здание № 5 располагается на проспекте Ф. Скорины в г. Полоцке. Объект является историко-культурной ценностью «3» категории. Длительное время в здании находились учебные помещения Профессионально-технического училища № 2 (с мая 2004 г. – Полоцкого государственного профессионально-технического колледжа, с июля 2014 г. – Полоцкого государственного химико-технологического колледжа).

В 2019 г. объект был приобретен частной компанией ООО «Форт кей» с целью устройства в нем гостиничного комплекса под названием «Гранд отель». Весной этого же года в здании начались ремонтно-строительные работы для переоборудования под новую функцию. Возникла необходимость детального натурного изучения памятника для сбора дополнительных сведений по реконструируемому историческому объекту, имеющему статус историко-культурной ценности. В том же 2019 г. были приобретены остальные примыкающие к зданию постройки, среди них дом № 3 по проспекту Ф. Скорины и объекты со стороны дворовой территории.

Фактически здание бывшего «Гранд отеля» по проспекту Ф. Скорины, дома № 3, 5 представляют собой комплекс четырех разнохарактерных в архитектурном, конструктивном и стилевом отношении строений, последовательно связанных между собой и напоминающих в плане форму буквы «Z». Всем частям здания можно дать условные наименования: восточное крыло – «Отель», западное крыло – «Сталинка», дворовая часть здания – «Перемышка» и северное, обращенное главным фасадом на параллельную проспекту улицу, – «Крепость» (рисунок 1).

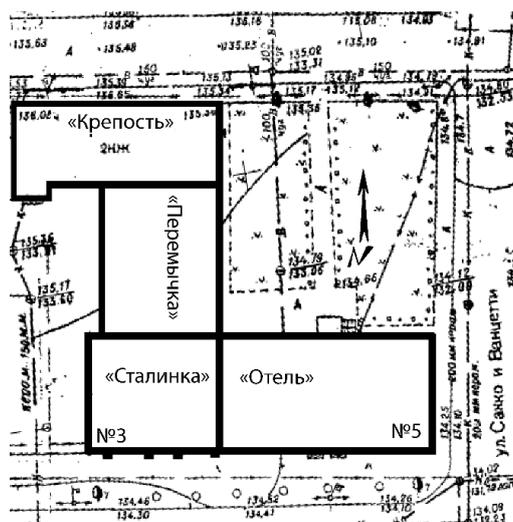


Рисунок 1. – Общий план расположения зданий «Гранд Отеля»

На проспект Ф. Скорины выходят фасады двух частей изучаемого здания: западная (дом № 3) и восточная (дом № 5). Данная работа посвящена натурным исследованиям стен второго этажа «Отеля», расположенного на углу проспекта Ф. Скорины и ул. Ленина (дом № 5) (см. рисунок 1).

**Основная часть.** Изучаемая нами часть комплекса в начале XX в. располагалась на углу ул. Витебской и Вознесенской, имела два лицевых фасада: южный и восточный с элементами архитектуры классицизма и эклектики. Северный фасад (со стороны двора) сегодня практически лишен украшений, а несогласованное расположение окон его этажей свидетельствует о наличии перестроек. Дата возведения здания «Отеля» неизвестна, однако по своим конструктивным и архитектурно-стилистическим особенностям его можно отнести к XIX – началу XX вв.

На планах Полоцка конца XVIII в. на месте исследуемого здания и прилегающей к нему территории зафиксирован ряд небольших кирпичных (?) строений, фрагменты которых могли быть включены в структуру изучаемого нами объекта при возведении.

Согласно данным «Маршрутов кварталов и дворовых участков по городу Полоцку. 1858–1859 гг.» (далее – «Маршруты»)<sup>1</sup>, на месте «Отеля» никаких строений не фиксируется, большой каменный дом находился на месте так называемой «Сталинки».

Изучаемый памятник пережил ряд серьезных перестроек, связанных с его восстановлением после войн и пожаров. Наиболее ранним из известных нам источников является проект от 15 мая 1874 г. по восстановлению здания после масштабного пожара 1871 г., в результате которого пострадала большая часть центральных кварталов города. Данный документ включал в себя планы обоих этажей и поперечный разрез здания с обозначением ряда перестроек (найден архитектором-реставратором В.В. Глинником в фондах Национального исторического архива Беларуси). Наличие проекта 1874 г. позволяет определить хронологический диапазон возведения здания между 1860 и началом 1870-х гг., который находит подтверждение в результатах натурных наблюдений. Последние показали, что основной массив здания сложен из малоформатного тонкого кирпича размерами: 4,5–5 × 12,5–13,0 × 24,5–25,0 см на известковом растворе. Обращает на себя внимание визуальное сходство формата кирпича изучаемого здания, характера кладочного раствора, способа кладок и конструкций на уровне подвала с аналогичными материалами и конструкциями ряда зданий Полоцка. Среди них – дом № 35 по ул. Нижне-Покровской, отмеченный в «Маршрутах» в качестве каменного амбара, позднее перестроенного в жилое здание. Еще один дом, сложенный из мелкого кирпича, по данным краеведа И.П. Дэйниса, до 70-х годов XX в. располагался на углу ул. Нижне-Покровской и Свердлова. Кроме конструкций зданий малоформатный кирпич также зафиксирован в кладках печей середины XIX в. при раскопках остатков постройки возле дома № 35 по ул. Нижне-Покровской археологом Н.И. Зданович<sup>2</sup> [1, с. 105; 3, с. 54].

Характер первоначального использования изучаемого здания не известен. Согласно данным путеводителя 1910 г., изданного к торжеству перенесения мощей преподобной Ефросиньи Полоцкой, и сведениям полоцкого краеведа И.П. Дейниса, на первом этаже здания располагалось Полоцкое общество взаимного кредита под руководством Баркана. Верхний этаж занимали жилые апартаменты<sup>3</sup>. Сама гостиница «Гранд отель», владельцем которого был купец Бакаев (Бакиев), располагалась на месте «Сталинки»<sup>4</sup>.

Очередной разрушительный пожар 1912 г. привел к новой масштабной реконструкции здания «Отеля», что подтверждают данные натурных исследований [2, с. 54, 55]. После революции 1917 г. в «Отеле» располагались различные учреждения и ведомства, результатом многочисленных перепланировок помещений с целью их приспособления для нужд новых хозяев стала полная утрата практически всех первоначальных элементов интерьеров и функционально-планировочной структуры здания.

В «Гранд отеле» (на месте «Сталинки») находились Революционный комитет (Ревком)<sup>5</sup> и Районный исполнительный комитет [1, с. 106]. В изучаемом здании «Отеля» (дом № 5) в годы Первой мировой войны в период оккупации Полоцка кайзеровскими войсками (1918 г.) располагались клуб немецких офицеров и казино. Оно пострадало из-за артобстрелов во время советско-польской войны 1919–1920 гг., позднее по ее окончании здание было восстановлено. В период НЭПа (1921–1930-е гг.) на первом этаже здания действовало казино, после его закрытия здесь разместили столовую народного питания, а с 30-х гг. XX в. помещения занял райком комсомола [1, с. 105].

В годы Великой Отечественной войны 1941–1944 гг. «Отель» выгорел изнутри и, как показали натурные исследования, серьезно пострадал от взрывавшихся вблизи бомб и снарядов – растрескались внешние стены, «провисли» клинчатые переемы некоторых оконных проемов.

После освобождения Полоцка от оккупации в 1944 г. здание было восстановлено силами Облпотребсоюза. Позднее «Отель» передали торговой школе, преобразованной сначала в кооперативный техникум, а затем в политехникум. По данным И.П. Дейниса, планировка этажей здания была полностью изменена в 1971 г.: появились бетонные перекрытия и лестница, перегородки в половину кирпича, полы из мелких цветных глиняных квадратных плиток, изготовленных на одном из заводов Минска [1, с. 106]. С 2000-х гг. изучаемое нами здание было расселено и длительное время пустовало.

<sup>1</sup> Маршруты кварталов и дворовых участков по городу Полоцку. 1858–1859 гг. – Национальный исторический архив Республики Беларусь. – Ф. 2523. Оп. 1. Ед. хр. 1.

<sup>2</sup> Здановіч, Н.І. Да пытання рэканструкцыі старажытнай забудовы Полацка / Н.І. Здановіч // Гісторыя і археалогія Полацка і Полацкай зямлі : матэрыялы IV Міжнар. навук. канф., Полацк, 23–24 кастр. 2002 г. – Полацк : НПГКМЗ, 2003. – С. 134.

<sup>3</sup> Дейнис, И.П. Полоцк в XX веке (1905–1967 гг.). Рукопись. – Фонды НПГКМЗ, КП-5 2774, экз. № 5 781 26.04.1972. – С. 105, 106.

<sup>4</sup> Принято считать «Гранд отелем» сохранившееся сегодня здание (дом № 5 по проспекту К. Маркса), но согласно данным И.П. Дейниса, самой гостиницей был дом № 3 на месте «Сталинки». Такая путаница связана с тем, что оба здания не только имели общую стену, но и первоначально были некогда связаны друг с другом в единый комплекс, что выяснилось в ходе их натурных исследований.

<sup>5</sup> См. сноску 3, С. 88.

Новый владелец здания (ООО «Форт кей») принял решение о его реконструкции и приспособлении для размещения гостиницы. После длительного периода запустения с весны 2019 г. были начаты исследовательские работы и подготовка к составлению проекта. Поскольку количество графических и письменных источников по истории изучаемого здания оказалось крайне ограниченным (имелись проект восстановления здания от 1874 г. и ряд чертежей БТИ), недостаток сведений предполагалось восполнить детальными натурными исследованиями памятника.

С этой целью на всех этажах выполнялись поисковые зондажи для выявления следов разновременных кладок, штукатурных и красочных наслоений, конфигурации дверных и оконных проемов. Полученные данные предполагалось использовать при поэтапном проектировании.

Первые зондажные работы показали, что часть кладок выполнена кирпичом формата 4,5–5 × 12,5–13,0 × 24,5–25,0 см от разобранных первоначальных частей здания, но основная масса переделок начала XX в. выполнялась кирпичом другого формата и размеров (толщиной до 6,0 см и длиной до 26,0 см, использовался с середины XIX в.). Кладки советского периода 70-х годов XX в. часто выполнялись на сложном известково-цементном растворе из ребристого пустотелого кирпича (продольные перегородки в южной части здания) [3, с. 55]. Кроме обычного красного кирпича имело место применение и шамотного желтого кирпича, используемого для кладки топок котельных.

Первые поисковые зондажи были устроены на наружных и внутренних стенах здания в виде полос на уровне подоконников и перемычек существующих проемов с целью выявления их переделок и ремонтов. Также велся поиск первоначальных дымоходов и вентиляционных каналов. Данные работы показали, что практически вся штукатурка в помещениях зданий относилась к ремонтам второй половины XX в. и особой ценности не представляет. В этой связи было принято решение о ее удалении с целью получения полной картины имеющихся в здании перестроек и выявления особо ценных участков стен (для последующего сохранения их в виде экспозиционных зондажей в интересах).

Работы показали, что при видимой однородности и упорядоченности планировки, здание на уровне второго этажа имеет ряд масштабных разновременных перестроек. Наиболее явные следы последних найдены в северо-западном углу здания. Они связаны как с включением в его состав более ранних строений, так и с ремонтами после войн и пожаров XX в.

Для удобства привязки описываемых объектов весь 2 этаж был разделен на условные отсеки: ЮВ – юго-восточный, ЮЦ – южный центральный, ЮЗ – юго-западный, СВ – северо-восточный, СЦ – северный центральный, СЗ – северо-западный. За основу разбивки здания на отсеки был взят план второго этажа с учетом как сохранившихся его внутренних капитальных исторических стен, так и тех, обнаружение следов которых предполагалось нами в ходе изучения памятника (рисунки 2–4).

Исследования стен северо-восточного (СВ) отсека показали, что они имеют ряд переделок. Окна в северной стене были первоначальными, они частично сохранили следы выложенных развернутым под углом кирпичом аутентичных откосов и клинчатые перемычки толщиной в кирпич.



Рисунок 2. – План второго этажа здания с обозначением разновременных кладок

Первоначальная ширина устья окон (судя по нижней части кирпичных перемычек) была около 1,3 м (см. рисунки 2; 3:2; 4:3 и 4). Проемы в восточной стене отсека, вероятно, пробиты позже и усилены рельсами. В юго-восточном углу помещения выявлена специально выполненная кирпичная штроба для перевязки капитальной продольной стены здания с его внешними стенами. Вместе с тем, на плане 1874 г. эти окна уже отмечены в качестве существующих, а не вновь пробиваемых (растески и перекладки стен составителем отмечались ярко красным цветом).

Исследования стен северо-восточного (СВ) отсека показали, что они имеют ряд

переделок. Окна в северной стене были первоначальными, они частично сохранили следы выложенных развернутым под углом кирпичом аутентичных откосов и клинчатые перемычки толщиной в кирпич. Первоначальная ширина устья окон (судя по нижней части кирпичных перемычек) была около 1,3 м (см. рисунки 2; 3:2; 4:3 и 4). Проемы в восточной стене отсека, вероятно, пробиты позже и усилены рельсами. В юго-восточном углу помещения выявлена специально выполненная кирпичная штроба для перевязки капитальной продольной стены здания

с его внешними стенами. Вместе с тем, на плане 1874 г. эти окна уже отмечены в качестве существующих, а не вновь пробиваемых (растески и перекладки стен составителем отмечались ярко красным цветом).

Западная стена СВ отсека (капитальная перегородка) имеет в центральной части остатки первоначального дверного проема. Со стороны отсека он имел расширенное устье, откосы которого были выполнены из развернутого под углом кирпича. Поскольку на месте проема была выполнена закладка и устроены дымоходы (?), его кирпичная клинчатая перемычка не сохранилась и была прослежена только по кирпичам ее пяток. Вместе с тем, согласно плану 1874 г., дверной проем отмечен в северной части стены. Снятие штукатурки показало наличие цельной неповрежденной пробивками кирпичной кладки (см. рисунки 2; 4:4).

В южной капитальной стене СВ отсека (продольная стена здания) прослежен ряд закладок разновременных дверных проемов первой половины XX в. Для их перемычек использовали рельсы узкоколейной железной дороги 1890 – начала 1900-х гг. Существующий проем в западной части данной стены имел деревянную перемычку. Над ним обнаружена часть полукруглой арки под самым потолком. Она, как и все первоначальные клинчатые перемычки проемов 60–70-х гг. XIX в., была толщиной в кирпич. Откосы первоначального проема, по всей видимости, были уничтожены при пробивке существующей двери; ширина его, судя по радиусу арки, составляла около 1,2–1,4 м (см. рисунки 2; 4:3).

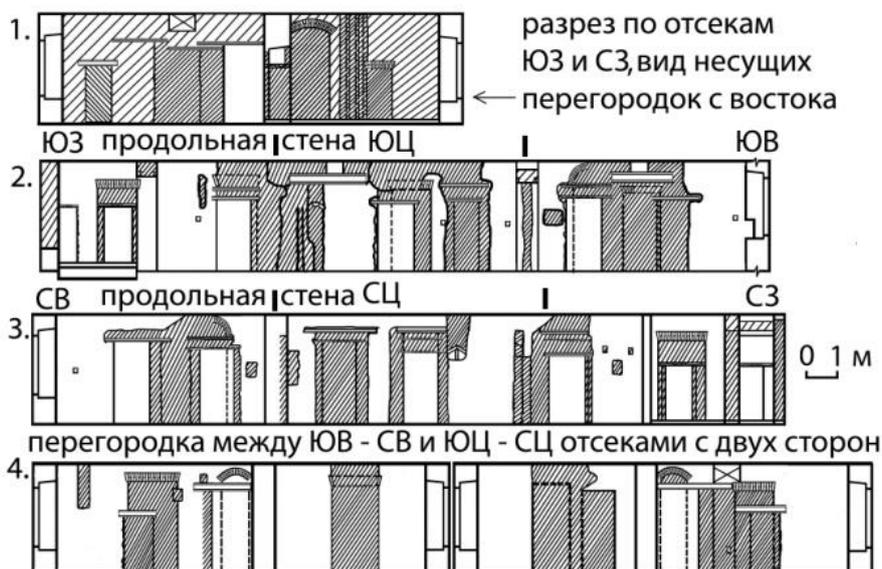
Вместе с тем, на плане 1874 г. данная стена показана глухой, без признаков каких-либо первоначальных проемов, там находилась треугольная печь. Дымоходы, располагавшиеся в месте соединения внутренних стен, соединялись с печью через отверстие около  $0,4 \times 0,35$  м, расположенное на середине высоты стены в юго-западном углу.

В северной и южной стене отсека сохранились отверстия от гнезд строительных лесов, закрытые (если края кладки не имели повреждений) поставленными на ребро половинками кирпича. На высоте около 1,6–1,7 м от уровня перекрытия отверстия, выполненные в кирпиче, составляли  $16,0–17,0 \times 16,0–17,0$  см, глубина их была аналогичной. Сохранившийся в отверстиях первоначальный раствор имеет отпечатки вынутых «пальцев» лесов 60–70-х гг. XIX в., на которые укладывались доски настила. Судя по поверхности отпечатков, для пальцев лесов использовали квадратные брусья со стороной 10–12 см и обтесанные с четырех сторон круглые бревна диаметром до 14 см (небольшая глубина их заведения в стены предусматривала использование дополнительных опор, врытых в землю) (см. рисунки 2; 3:2; 4:3).

Согласно плану 1874 г., северо-восточный отсек был единым помещением с треугольной печью в юго-западном углу. Данная печь имела два ризалита по краям и дымоход, расположенный в месте соединения южной и западной стены отсека.



Рисунок 3. – Развертки южной (1), северной (2), западной (3) стены здания, вид перегородки с запада в отсеках СЗ и ЮЗ (4)



1 – перегородка в отсеках СЗ и ЮЗ (вид с востока); 2 и 3 – продольная стена здания; 4 – вид перегородки с обеих сторон между отсеками СЦ–СВ и ЮЦ–ЮВ

Рисунок 4. – Развертки

Дальнейшие исследования в центральной части по северной стороне здания (СЦ отсек) показали, что на границе между северным, центральным и северо-западным отсеком признаки капитальной стены отсутствуют (см. рисунки 2; 3:2; 4:3).

Южная продольная стена здания имеет много разновременных перекладок и сильно повреждена в XX в. при устройстве проемов и дымоходов. Ее первоначальная кладка сохранилась в виде столбов различной ширины. Судя по кирпичу закладок (вторичное применение старого), известковому и известково-цементному (?) раствору, большинство из них было выполнено в 40–70-е гг. XX в. в связи с переделкой и переносом дымоходов, вентиляционных шахт и дымовых каналов. От первоначальных и более поздних дверных проемов остались фрагменты откосов, которые нередко имели выкладку развернутым под углом кирпичом, как и первоначальные. Перемычки найденных нами поздних проемов были деревянными, реже металлическими (из рельсов и двутавровых швеллеров). Обследование дымоходов показало, что большинство из них прорублено позднее, первоначальные среди них выявить не удалось. Закладка дымоходов велась на глине (см. рисунки 2; 4:3).

Снятие штукатурки с северной внешней стены здания (со стороны помещений) показало, что окна имеют растеску первоначальных откосов и усиленные рельсами узкоколейной дороги 1890 – начала 1900-х гг. клинчатые перемычки, подоконные части стен местами переложены. Между окнами в простенках имеются гнезда от лесов, по устройству аналогичных тем, что были в северо-восточном отсеке. Вместо третьего от восточной стены окна некогда была пробита дверь. На плане 1874 г. откосы данного проема отмечены ярко-красным цветом, что может быть связано с его переделкой в дверь. При снятии штукатурки по северному фасаду, под откосами были выявлены остатки гнезд для консолей деревянного или металлического балкона (см. рисунки 2; 3:2).

Восточная стена между отсеками СВ и СЦ представлена капитальной перегородкой. В ее центре на месте первоначального дверного проема устроены дымоходы. В южной части стены имеются следы запечной (?) ниши, устроенной в начале XX в. при переделке дверного проема в дымоход. Судя по всему, ниша была неглубокая (на глубину в кирпич (25–26 см)), поэтому никакой перемычки не имела. В ней сохранились остатки побеленной штукатурки (см. рисунки 2; 3:4).

Согласно плану 1874 г., в данном отсеке здания были деревянные перегородки и служебная лестница. В юго-восточном углу имела печь, аналогичная по форме той, что была в северо-восточном отсеке.

Наиболее интересные и неожиданные результаты дало изучение стен в северо-западном (СЗ) отсеке здания. Западная часть отсека была отделена несущей кирпичной перегородкой и образовывала две камеры. Южная была квадратной, северную – в виде неправильной трапеции – перекрывали своды на металлических балках (рельсах).

В южной (продольной стене) хорошо сохранился уменьшенный закладками дверной проем с клинчатой перемычкой. Далее в самом углу, в месте стыка с соседним зданием, имелся небольшой косой проем с криволинейными очертаниями откосов. Судя по характеру поверхностей и расчищенных кладок, его прорубили после возведения здания из угла в угол. Он уже отмечен на плане 1874 г., но не совсем точно, поскольку в самом изображении здания имеется ряд неточностей (см. рисунки 2; 4:3).

Северная стена СЗ отсека имеет три первоначальных оконных проема с растесанными откосами и аутентичными клинчатыми перемычками. Окно в северной камере со сводами на рельсах меньше остальных, но частично сохранило первоначальные очертания откосов. В подоконной части имеется ряд перекладок XX в., на плане 1874 г. откосы данного окна отмечены ярко красным цветом, что может быть связано с их растеской (в помещении был туалет) (см. рисунки 2; 3:2).

Западная стена СЗ отсека фактически расположена под углом к остальному зданию, собственно, благодаря чему и образовалась северная камера в западной части отсека. На плане 1874 г. она перпендикулярна и параллельна остальным. Расчистка камеры показала, что она не имеет перевязки с остальными стенами здания, а широкие швы со следами подрезки и крупноформатный кирпич (6,5–7,0 × 14,0–15,0 × 27,5–29,0 см) свидетельствуют о ее принадлежности к постройке XVIII в., что объясняет неправильное расположение помещения (под небольшим углом) относительно изучаемого нами здания. Снятие штукатурки выявило срубленные кирпичные наличники окон второго этажа, прослеженные на высоту от существующего пола камеры на 1,3 м по верху арки наличника и кирпичной перемычки.

Перемычки найденных окон имели различную конструкцию: у южного окна – лучковая арка, у северного – горизонтальная выкладка кирпичом на кромку, с подведенной под них обугленной доской (см. рисунки 2; 3:3; 5). Это отчасти напоминало конструкцию оконных проемов Домика Петра I в Полоцке, полностью отстроенного в кирпиче в 1692 г. [4, с. 78, 79, 83]. Над окнами сохранились гнезда от строительных лесов с отпечатками полукруглых плах. Стена XVIII в. сохранилась от пола северной камеры на высоту около 2,25 м, но признаков венчающего карниза или фриза на ней проследить не удалось, ее возможная граница – выпуклая кладка с полосой штукатурки, окрашенной розовым цветом в XIX в. Южная часть данной стены под сводом камеры была выломана в XIX в., позднее в XX в. она была растесана. Там располагался проход в соседнее здание. После его раскрытия выяснилось, что толщина стены конца XVIII в. на уровне второго этажа около 0,65 м (что соответствовало общей длине двух усредненных крупноформатных кирпичей XVIII в. и слоя раствора между ними). В южной части стыка двух зданий на уровне второго этажа данная стена была полностью уничтожена.

На плане 1874 г. камера представлена единым помещением (оно было туалетом типа «люфт-клозет»), отделенным от остальной части отсека кирпичной капитальной стеной, в центральной части которой предполагалось пробить место для проемной печи. В месте ее примыкания сохранились выкладки кирпичных штроб для перевязки стен и гнездо для устройства строительных лесов.



Рисунок 5. – Заложенные проемы стены конца XVIII в.

Последние исследования показали, что сохранившаяся сегодня поперечная стена (перегородка) была сложена после пожара 1912 г., когда выгорела центральная часть города и пострадавший «Отель» вновь пришлось восстанавливать. При данном ремонте здания проход, прорубленный через угол его западной и продольной стен в начале 70-х г. XIX в., видимо, был сохранен или переделан в нишу. Вновь возводимая перегородка была поставлена на старых фундаментах со смещением продольной оси, она служила опорой для двух сводов различных конструкций, имеющих в южной и северной камерах (угол СЗ отсека). Южная часть стены сегодня представляет собой замурованную арку, врезанную южной пятой в продольную стену здания. Между ее закладкой на продольной стене сохранилась штукатурка с покрасками неопределенных цветов, перекрывающая закладкой арки (см. рисунки 2; 3:4; 4:1).

В центральной части перегородки, сложенной после 1912 г., имеется невысокий проем с клинчатой перемышкой. Откосы проема выполнены развернутым под углом кирпичом (его размеры с учетом устья –  $2,0 \times 1,0$  м). Между откосом и аркой с восточной стороны в первой половине XX в. прорублены три дымохода, в одном из которых сохранилась чугунная вьюшка с буквами «ПМЗ». При расчистке закладки найдены котельные шамотные кирпичи с вогнутым эллиптическим клеймом «МВ» (см. рисунки 5 и 6). В северной части данной стены со стороны камеры был расчищен прорубленный и тщательно оштукатуренный наклонный канал квадратного сечения (около  $14,0 \times 20,0$  см в сечении). В северо-восточном углу помещения наклонный канал соединялся с вертикальным каналом, вероятно прорубленным под трубу (?) (см. рисунки 2; 3:4).



Рисунок 6. – Рамка вьюшки и шамотный кирпич с надписью «МВ» из СЗ отсека

Подобное устройство перегородки, отделяющей северную камеру от остальной части отсека, связано с тем, что помещение первоначального «люфт-клозета» при ремонте после пожара 1912 г. было разделено на две неравные части. Сам «люфт-клозет» теперь занимал большее помещение с окном и сводом из отдельных лучковых секций на рельсах. Данный способ укладки отдельных лучковых кирпичных сводов по рельсам, взамен двутавровых швеллеров, получил широкое распространение в Полоцке в конце XIX – начале XX вв. Он применялся преимущественно для перекрытия небольших пролетов при строительстве зданий частными лицами, поскольку на железнодорожных станциях Полоцк-1 и Полоцк-2 вышедшие из употребления рельсы было легче приобрести и доставить на объект [5, с. 93; 6, с. 106].

Южная камера была отделена от «люфт-клозета» дополнительной капитальной стеной и перекрыта сводом шириной около 1,25 м, позже эта стена была почти вся вырублена и заменена перемышкой – двутавровым швеллером. Свод, в виде упомянутой замурованной арки, прослежен на восточной стороне капитальной перегородки (см рисунки 2; 3:4; 4:1). Таким образом, южная камера первоначально представляла собой проход, соединивший после 1912 г. «Отель» и стоявшее на месте нынешней «Сталинки» здание конца XVIII в.

Полы в большей части северо-западного отсека были выстланы в 70-х гг. XX в. из цельной керамической плитки. Эти изделия были очень прочными и износостойкими. Судя по клейму, плитка производилась в г. Минске. Устройство подобных полов связано с тем, что при реконструкции здания в 1971 г. здесь планировалось разместить санузлы.

Снятие штукатурки на южной и восточной стене юго-восточного отсека (ЮВ) позволило выявить следы масштабных растесок откосов окон. Первоначальные клинчатые перемычки сохранились на южной стороне, они были усилены металлом – рельсами (многие с надписями) 1890 – начала 1900-х гг. Центральное окно, над которым располагалась несущая плита, следов первоначальной перемычки не имело, ее заменили двутавровым швеллером. Данная конструкция служила опорой для балки, составленной из двутавровых швеллеров, державшей плиты перекрытия.

В простенках на уровне середины высоты окон прослежены гнезда от строительных лесов (см. рисунки 2; 3:1). Окна, расположенные в стене по восточной стороне отсека, имели только рельсовые перемычки. У двух из них откосы были неоднократно растесаны и переложены. Они, вероятно, также позднего происхождения. Необычно устройство откоса крайнего окна в северной части восточной стены юго-восточного отсека. Северная (продольная) стена отсека ниже уровня окна перевязки не имеет, выше она перекрывает и частично врезана в откос проема. На высоту 0,7 м от поверхности кирпичной кладки подоконника прослежен откос, выполненный из развернутого под углом кирпича. Выше данного уровня прослежена перевязка двух стен. Судя по всему, при прорубании нового проема первоначально планировалось устройство полноценного оконного откоса, но затем, во избежание ослабления перевязки двух стен, каменщики выполнили вычинку кладок и связали их с точным повторением рисунка кладки. При этом кирпич откоса был несколько толще того, который использован в стене, что свидетельствует о неоднократных изменениях первоначального проекта здания уже в ходе его строительства (см. рисунки 4:2; 7).



Рисунок 7. – Стык продольной стены и перевязка его в районе оконного проема, отпечаток доски первоначального подоконника на растворе

На уровне низа данного оконного проема сохранился отпечаток доски подоконника на растворе. Толщина доски, судя по отпечатку, составляла 4–5 см. Подоконные стены большинства окон выломаны и переложены (см. рисунки 4:2; 7). Согласно плану 1874 г., откосы данного и расположенного южнее него окна отмечены ярко красным цветом, что может указывать на время их прорубания или переделки.

Далее продольная стена здания (здесь северная стена ЮВ отсека) имеет перебитые проемы. В центральной ее части под балкой 70-х гг. XX в. сохранился фрагмент клинчатой перемычки как первоначального, так и прорубленного позднее проема. Толщина перемычки в кирпич, но на плане 1874 г. он не отмечен. Ближе к северо-западному углу под потолком прослежен фрагмент арки, которая ранее была найдена в северо-восточном отсеке, что свидетельствует о наличии здесь первоначального сквозного проема (см. рисунки 2; 4:2).

Западная стена была прорублена в северной части для устройства коридора. В центральной части помещения она имеет первоначальный дверной проем с клинчатой перемычкой толщиной в кирпич. Южный его откос срублен при устройстве нового дверного проема с перемычкой из двутаврового швеллера. На уцелевших частях стены сохранились очертания устья проема в виде развернутой под углом кирпичной кладки. Далее стена имеет перекладки, связанные с устройством дымоходов, и опоры для швеллера проема коридора 70-х г. XX в. Над швеллером, перекрывающим последний, имелась небольшая арка. Толщина ее в кирпич, ширина, с учетом утраченной пяты, около 1,3 м. Согласно плану 1874 г., в данной арке западной стены располагалась проемная печь. Вход в помещение был в южной части его западной стены, но после полного снятия штукатурки выяснилось полное отсутствие следов указанного в проекте проема. Кладка стены здесь повреждений не имела (см. рисунки 2; 4:4).

Восточная стена южного центрального отсека (ЮЦ) является упомянутой выше перегородкой с перекладками в северной части для устройства проема под коридор. Она имеет первоначальный дверной проем, который сохранил клинчатую перемычку. Южный откос уничтожен при устройстве нового дверного проема меньших размеров, перекрытого двутавровым швеллером. Между прорубленным для коридора проемом и первоначальной дверью сохранились перекладки и пробитые дымоходы XX в. с остатками срубленного карниза под существующим бетонным потолком. Там же часть стены имеет закладки, связанные с дымоходами и созданием опоры для швеллера проема коридора. Над самим проемом коридора сохранился обнаруженный со стороны юго-восточного отсека фрагмент арки под потолком (см. рисунки 2; 4:4).

По южной стене окна частично сохранились первоначальные клинчатые перемычки 60-х – начала 70-х гг. XIX в., они имели усиление рельсами (многие из них с надписями) 1890 – начала 1900-х гг. В центральном проеме прослежены откосы первоначальных балконных дверей. Окно на запад от бывшего выхода на балкон имеет в качестве перемычки двутавровый швеллер – основание для несущей балки под потолочные плиты (см. рисунки 2; 3:1).

По северной стене отсека сохранились остатки первоначального проема с разбитой клинчатой перемычкой, а также многочисленные перекладки и закладки проемов и дымоходов XX в. Ряд проемов имеют перемычки из рельсов конца 1890 – начала 1900-х гг., некоторые перекрыты деревянными щитами (см. рисунки 2; 4:2).

Согласно плану 1874 г., западной стороной отсека была деревянная перегородка. В ней, в северо-западном углу отсека, располагалась треугольная печь, подобная тем, что стояли в северной части здания. В центре восточной стены находилась дверь в юго-восточное помещение. В северной части отсека имелись широкие двери, проем которых с остатками клинчатой перемычки был обнаружен в продольной стене. В северо-восточном углу помещения в капитальную стену была встроена проемная печь, для ее устройства рядом с дверью был предусмотрен высокий арочный проем (см. рисунки 2; 4:2 и 4).

Юго-западный отсек (ЮЗ) разделен на две неравные части капитальной перегородкой. Фактически по конструктивным особенностям восточная часть отсека является продолжением южного центрального отсека. Восточная часть южной стены имеет два первоначальных окна с частично сохранившимися первоначальными откосами, выполненными развернутым под углом кирпичом и с клинчатыми перемычками (см. рисунки 2; 3:1). Разделяющая ЮЗ отсек капитальная перегородка имеет в южной части замурованный дверной проем, усиленный двутавровым швеллером (см. рисунки 2; 3:4; 4:1).

По северной (продольной) стене отсека сохранились остатки первоначального проема с разбитой клинчатой перемычкой (его западный откос с крайним кирпичом от клинчатой перемычки) и многочисленные перекладки и закладки проемов и дымоходов XX в. Ряд проемов имеют перемычки из рельсов 1890 – начала 1900-х гг. (см. рисунки 2; 4:2).

Наибольший интерес представляет отделенная капитальной перегородкой западная часть отсека. Данная перегородка с южной и северной стеной здания перевязки не имеет. Полное снятие штукатурки со стороны западной части ЮЗ отсека показало, что она также имела ряд перекладок, на уровне межэтажного перекрытия прослежены срезанные рельсы (ранее предполагалось, что это швеллера) для устройства кирпичных лучковых сводов. Над остатками данного перекрытия прослежен замурованный проем с двутавровым швеллером вместо перемычки. Для кладки использован кирпич толщиной 5,5–6,0 см (данная кладка выполнена предположительно после пожара 1912 г. одновременно с возведением сводов на рельсах) (см. рисунки 2; 3:3 и 4).

На уровне первого этажа южная и западная стены имеют уступы. Западная стена содержит остатки междуэтажного свода на швеллерах (предположительно три пролета) и ряд заделанных проемов. Над местом разрушенного междуэтажного свода на швеллерах прослежен замурованный дверной проем с лучковой аркой шириной около 1,1 м, дальнейшие промеры между остатками рельсов показали различную ширину пролетов между ними (0,7, 0,86, 10,5 м), на которые опирались некогда кирпичные лучковые своды перекрытия. В северной части конструкции было поставлено два рельса, чтобы создать надежную опору для пяты крайнего свода, который фактически висел в воздухе. На эти рельсы можно было установить и легкую перегородку. Над указанным выше дверным проемом прослежена закладка большого участка на глине (?), по данным плана 1874 г. он отсутствует. В северной части западной стены прослежен заложенный большой проем с лучковой аркой под самым потолком шириной 1,43 м, ведущий в здание конца XVIII в., предшествовавшее нынешней «Сталинке». (см. рисунки 2; 3:3 и 4). В северо-западном углу отсека прорублен вход в камеру со сводами, бывшую переходом между двумя зданиями.

В северной стене обнаружен хорошо сохранившийся первоначальный частично замурованный проем с клинчатой перемычкой, который вел в здание, стоявшее на месте «Сталинки». Над лестницей сохранился свод на швеллерах (или рельсах), вероятно, построенный после пожара 1912 г. (см. рисунки 2; 2:3 и 4; 4:2). По южной стене окно сохранило первоначальную клинчатую перемычку 60 – начала 70-х гг. XIX в. (см. рисунки 2; 3:1).

При сравнении существующей планировки здания с планом 1874 г. заметно, что юго-западный отсек был сильно перестроен, хоть и не изменил своего назначения. Первоначально здесь располагалась Г-образная лестница. Деревянные перегородки делили весь отсек на три части. Вдоль лестницы в северо-западной части помещения имелся узкий проход, который вел к прорубленному в северо-западном углу подъезда проему в бывший переход (отсек СЗ). Сразу перед лестницей имелся узкий коридор с окном, в который выходила топка печи. В юго-западной части отсека над лестницей имела комната в два окна с печью в северо-западном углу. В стене за ней предполагалась ниша (стена отмечена ярко красным цветом), однако исследования показали наличие там замурованного первоначального небольшого дверного проема с лучковой аркой. Верхняя часть стены имела ряд закладок первоначальных проемов или ниш, существовавших, судя по ровным швам, до пожара 1874 г. После пожара 1912 г. возводится существующая несущая перегородка, разделившая отсек на две неравные части, и устраиваются перекрытия из лучковых сводов на рельсах. Помещение над лестницей было уменьшено и теперь имело одно окно.

**Заключение.** Таким образом, на основании проведенных нами натурных исследований памятника при их сопоставлении с планом второго этажа 1874 г. можно сделать следующие выводы:

1. Первоначальное здание было возведено между 1860 и 1870-ым гг. и сильно пострадало в пожаре 1871 г. (выгорело изнутри). Снятие штукатурки в камере со сводами показало, что при строительстве в западную часть здания были включены остатки постройки конца XVIII в., архитектурным убранством фасада напоминавшей дом генерал-губернатора или жилой корпус братской школы Богоявленского монастыря в Полоцке. Данная постройка

обозначена на планах Полоцка 1786 и 1810–1812 гг. На момент возведения изучаемого нами здания дом конца XVIII в. был приобретен владельцем отеля. Об этом говорит соединение двух строений через дверь и большую арку проема на уровне второго этажа. Над упомянутым выше небольшим дверным проемом, видимо, располагалась еще одна лестничная площадка для входа на чердак западной части здания (видна большая закладка над аркой дверного проема).

2. Изучение фрагментов первоначальных внутренних стен показало, что в исследуемой части здания (до пожара 1871 г.) располагались апартаменты владельца, обращенные окнами в южную сторону. Юго-западный отсек занимали прихожая, деревянная лестница с небольшой комнаткой над ней (вероятно швейцарская). Центральный южный, юго-восточный и северо-восточный отсеки были жильем домовладельца. Расчистка и фиксация различных перекладок стен показала, что все комнаты между собой связывали широкие дверные проемы с клинчатыми арками. Они находились в центральных частях несущих стен и имели двухстворчатые двери. В северо-западной части дома находились холодная уборная, жилье прислуги и черная лестница. Печи были сосредоточены в местах углов соединения внутренних стен и располагались в высоких сквозных проемах с лучковыми арками. Таким образом осуществлялся обогрев смежных комнат.

3. Восточная стена здания, судя по выявленным перекладкам (не выявлено ни одного аутентичного откоса или перемычки) в ныне существующем центральном проеме, по первоначальному проекту могла не иметь окон вообще. Фальшивые окна могли сделать на фасаде. В ходе строительных работ в планы внесли изменения, было сделано окно или ниша (со стороны помещения) по центральной оси восточного фасада. По всей видимости, это произошло до пожара в 1871 г., когда на доме еще велись строительные работы, в результате которых были пробиты некоторые окна по восточному фасаду второго этажа. На плане 1874 г. стена уже имеет все окна, но некоторые из них переделывались (пробивались?) на основе ниш, имеющихся на восточном фасаде. Тогда же в качестве перемычек, вероятно, впервые использовали обрезки списанных рельсов Риго-Орловской железной дороги, движение по которой на Полоцком участке открыто в 1866 г. Окончательно на данный вопрос ответило бы изучение клейм их производителей.

4. После пожара 1871 г. часть комплекса была продана и у изучаемого нами здания, как и у постройки XVIII в., были разные владельцы. На это указывает ряд работ по их разделению. В частности, была замурована большая арка и вход на чердак западной части здания, на месте небольшого дверного проема предполагалось устройство запечной ниши (они обычно делались глубиной 1–1,5 кирпича). Исследования стен второго этажа показали, что часть первоначальных дверей была замурована, уменьшено количество печей в апартаментах. Тогда же в здании появилась гранитная лестница. В северо-западном углу юго-западного отсека была прорублена новая дверь в уборную, которую снабдили небольшой печью. Тогда же в уборной незначительно растесали откосы окна. Полученные результаты исследований увязываются с данными плана 1874 г., где отмечены следы ряда выявленных нами перестроек.

5. Разрушения, нанесенные пожаром 1912 г., стали причиной масштабной реконструкции здания. Перекалывается на старом фундаменте капитальная стена между уборной и жильем прислуги в северо-западном отсеке. В уборной делаются перекрытия в виде небольших кирпичных сводов на металлических балках, в качестве которых использовали обрезки железнодорожных рельсов и узких двутавровых швеллеров. После пожара 1912 г. у исследуемого нами здания и постройки XVIII в. был вновь один владелец. Об этом говорят строительные работы по их соединению. Ранее замурованные большую арку и дверной проем в помещении над лестницей расчищать не стали. В южной части уборной (отсек С3) был устроен проход с шириной свода в 1,2–1,25 м, который вновь связал «Отель» и строение XVIII в. на месте существующей «Сталинки». Тогда же реконструируется и лестница, расположенная в юго-западном отсеке. Занимаемое ею пространство сужается путем возведения новой кирпичной стены. Одновременно в качестве потолка и междуэтажного перекрытия делаются небольшие своды на металлических балках, в качестве которых использовали обрезки железнодорожных рельсов.

Обширные четырехкомнатные апартаменты, занимавшие весь второй этаж, теперь разделяются на две части и приспособляются под номера для богатых постояльцев. Угловые комнаты в северо-восточном и юго-восточном отсеке использовались в качестве спален, перед ними были проходные передние. При проведенных для их обустройства работах большинство первоначальных дверных проемов были сохранены.

6. После революции 1917 г. в бывшем «Гранд отеле» располагался совет рабочих и солдатских депутатов. Во время оккупации Полоцка кайзеровскими войсками в 1918 г. здесь разместились клуб и казино для немецких офицеров. После восстановления советской власти и во время советско-польской войны 1919–1920 гг. тут непродолжительное время находился Революционный комитет, но из-за постоянных обстрелов он быстро покинул бывшую гостиницу<sup>6</sup>. На первом этаже в период НЭПа в 1921 – начале 1930-х гг. были казино и после него столовая народного питания, с 1930-х годов его занял райком комсомола [1, с. 105]. С учетом длительного периода восстановления Полоцка в период НЭПа следы наиболее масштабных ремонтных работ относятся к его приспособлению под кабинеты райкома комсомола. В ходе их производства большая часть элементов интерьера и планировки здания была утрачена, поскольку пробивались новые дверные проемы с перемычками из деревянных щитов и рельсов от узкоколейной дороги 1890 – начала 1900-х годов., новые дымоходы, уничтожившие первоначальные.

7. В годы Великой отечественной войны изучаемое нами здание было частично сожжено. Вероятно, при восстановлении все оконные и часть дверных проемов были вновь усилены рельсами от узкоколейной дороги

<sup>6</sup> См. сноску 3, С. 58, 64, 88.

1890 – начала 1900-х гг. При этом их высота была понижена, о чем говорят расположенные на разных уровнях рельсы и деревянные перемычки. Тогда же, вероятно, в стенах прорубили новые дымоходы, в которых установили вьюшки с надписью «ПМЗ». В их закладках был использован шамотный кирпич с овальным вогнутым клеймом с надписью «МВ». Подобный кирпич обычно использовался для кладки котлов парового отопления.

8. В 1971 г. здание кардинальным образом перестраивается внутри (остается только коробка из несущих стен и своды над лестницей и бывшими туалетами) и приспособливается под учебные классы, приобретая коридорную систему. Деревянные перекрытия были заменены бетонными плитами, прежняя гранитная лестница – разобрана, новая (бетонная) – развернута в противоположную сторону и ориентирована на внутренний коридор здания. Полы в санузлах выстилаются керамической плиткой. Вплоть до 2019 г. здание не подвергалось значительным ремонтам и реконструкциям.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дэйніс, І.П. Полацкая даўніна / І.П. Дэйніс. – Мінск : Медисонт, 2007. – 330 с.
2. Дейнис, И.П. Полоцк в XX веке. 1905–1914 гг. / И.П. Дейнис ; сост., предисл., примеч. А.И. Судника. – Полоцк : Полоц. кн. изд-во, 2012. – 71 с. – (Наследие Полоцкой земли).
3. Здановіч, Н.І. Кафлярства ў Беларусі (на матэрыяле калекцыі полацкай кафлі) : метада. дапам. / Н.І. Здановіч. – Мінск : БДПУ, 2005. – 102 с.
4. Соловьёв, А.А. Усадебный комплекс «Домик Петра I в городе Полоцке»: История. Владельцы. Легенды / А.А. Соловьёв. – Полоцк : Полоц. кн. изд-во, 2015. – 123 с.
5. Салаўёў, А.А. Гарадская прастора Полацка ў складзе Расійскай імперыі (канец XVIII – пачатак XX ст.): гістарычныя традыцыі і новыя рэаліі / А.А. Салаўёў // Полацк у святле станаўлення гістарычных і нацыянальных форм беларускай дзяржаўнасці (IX–XX стст.) : манагр. / Д.У. Дук [і інш.]. – Магілёў : МДУ імя А.А. Куляшова, 2019. – С. 77–96.
6. Шуберт, Ф. Сельскохозяйственная архитектура: общедоступное руководство к возведению сельскохозяйственных построек / Ф. Шуберт. – СПб. : Изд. П.П. Сойкина, 1906. – 208 с.

## REFERENCES

1. Deinis, I.P. (2007). *Polatskaya daunina*. Minsk: Medisont. (In Belarus.).
2. Deinis, I.P. (2012). *Polotsk v XX veke. 1905–1914 gg.* Polotsk: Polots. kn. izd-vo. (In Russ.).
3. Zdanovich, N.I. (2005). *Kaflyarstva u Belarusi (na materyyale kalektsyi polatskai kafli)*. Minsk: BDPU. (In Belarus.).
4. Solov'ev, A.A. (2015). *Usadebnyi kompleks "Domik Petra I v gorode Polotske": Istoriya. Vladel'tsy. Legendy*. Polotsk: Polots. kn. izd-vo. (In Russ.).
5. Salauue, A.A. (2019). *Garadskaya prastora Polatska u skladze Rasiiskai impyeryi (kanets XVIII – pachatak XX st.): gistorychnyya tradytsyyi i novyya realii*. In D.U. Duk [et al.] *Polatsk u svyatle stanaulennya gistorychnykh i natsyyanal'nykh form belaruskai dzyarzhaynastsy (IX–XX stst.)* (77–96). Magileu: MDU imya A.A. Kulyashova. (In Belarus.).
6. Shubert, F. (1906). *Sel'skokhozyaistvennaya arkhitektura: obshchedostupnoe rukovodstvo k vozvedeniyu sel'skokhozyaistvennykh postroek*. St. Petersburg: Izd. P.P. Soikina. (In Russ.).

Поступила 13.04.2022

**FIELD STUDIES OF THE SECOND FLOOR OF THE FORMER GRAND HOTEL BUILDING,  
5 F. SKORINA AVENUE, POLOTSK**

**A. SOLOVIOV**

*The article provides the results of a full-scale study of the second floor of the former Grand Hotel Building. The probing of the walls revealed a number of reconstructions of the building at different times and made it possible to clarify its original layout. The most extensive reconstructions of the building took place in 1874, 1912 and 1971, which led to the complete loss of all elements of its original interiors.*

*During the study of the masonry of the existing building, a fragment of the wall of an XVIIIth century building was found as part of the studied floor, about which there is no information. The outlines of the brick building in the western part of the object we are studying are known only from the plans of Polotsk at the end of the XVIIIth century, but its purpose and type of architecture are not indicated. During the work, a number of architectural elements of the eastern facade of this building were cleared – the remnants of windows and cornices. It was found that in the middle of the XIXth century during the construction process in the eastern part of the "Grand Hotel" at the level of the second floor, it was connected with the building of the XVIIIth century that we have identified. By that time, it had already been rebuilt through two arched openings. This indicated that both buildings had the same owner for some time, but soon they were divided and completely isolated from each other.*

*The buildings were connected again only after 1912 by arranging a new passage and using vaults on rails as ceilings for the entrance and toilets.*

**Keywords:** *The Grand Hotel, probing, field studies, brick vaults on rails, "backlash closet", the fire of 1912.*

## ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 556.18(476)

DOI 10.52928/2070-1683-2022-31-8-112-123

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РЫБХОЗА «ЛОКТЫШИ» НА СТОК РЕКИ ЛАНЬ

д-р геогр. наук, проф. А.А. ВОЛЧЕК<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц. С.И. ПАРФОМУК<sup>2</sup>,  
канд. техн. наук, доц. Н.Н. ШЕШКО<sup>3</sup>, канд. геогр. наук, доц. Н.Н. ШПЕНДИК<sup>4</sup>,  
Д.Н. ДАШКЕВИЧ<sup>5</sup>, С.В. СИДАК<sup>6</sup>, М.Ф. КУХАРЕВИЧ<sup>7</sup>  
(Брестский государственный технический университет)  
<sup>1</sup>volchak@tut.by, <sup>2</sup>parfom@mail.ru, <sup>3</sup>optimum@tut.by, <sup>4</sup>shpendik@tut.by,  
<sup>5</sup>dionis1303@mail.ru, <sup>6</sup>harchik-sveta@mail.ru, <sup>7</sup>kukharevichmikhail@gmail.com

*В результате исследования выполнена комплексная оценка воздействия рыбхоза «Локтыши», расположенного в бассейне р. Лань в районе д. Будча, на гидрологический режим реки. Определены величины допустимого изъятия поверхностных вод из реки, используемых для нужд рыбхозов, с учетом потерь на испарение с водного зеркала и фильтрации из водохранилищ и прудов, при обеспечении условия сохранения в реках экологического стока, что позволит определить наиболее эффективный режим наполнения рыбоводческих прудов.*

**Ключевые слова:** *рыбоводное хозяйство, эвтрофирование, рекогносцировочное обследование, экологический сток, расход воды, математическая модель, водность года, поперечный профиль, верхний створ, нижний створ.*

**Введение.** Рыбное хозяйство является уникальным видом производства и играет важную роль в продовольственном комплексе Республики Беларусь, обеспечивая население качественными продуктами питания. Для устойчивого обеспечения потребности населения Беларуси необходимо не менее 180 тыс. т рыбы и рыбной продукции в год.

В настоящее время основная часть этого объема импортируется в виде продуктов глубокой заморозки. Доля собственной, наиболее ценной, свежей и живой рыбы составляет около 8%. В то же время водный фонд Беларуси насчитывает более 10 тыс. озер общей площадью около 200 тыс. га, 150 водохранилищ общей площадью 80 тыс. га, 20,8 тыс. различных рек общей протяженностью 90,6 тыс. км<sup>1</sup>. Кроме того, насчитывается 21,86 тыс. га прудов рыбоводных хозяйств, 4,6 тыс. га прудов, а также 17,0 тыс. км каналов различного назначения. Большая часть производимой в республике рыбы (около 78%) выращивается в прудах, но площадь их не превышает 10% от всех имеющихся водоемов. Это свидетельствует об огромных резервах по выращиванию рыбы в озерах, водохранилищах, реках, мелиоративных каналах, потенциальные возможности которых используются недостаточно. Изменение данной ситуации позволит снабжать населения страны продуктами питания на основе рыбы и морепродуктов в необходимом количестве, высокого качества и по доступным ценам<sup>2</sup>.

Рыбное хозяйство непосредственно связано с использованием водных ресурсов и предъявляет очень высокие требования к их режиму, количественному и качественному состоянию. Для успешного воспроизводства и нормального развития рыбы необходимы чистая вода с достаточным количеством растворенного кислорода и отсутствием вредных примесей, соответствующая температура и обеспеченность кормами. Нормативы качества воды для рыбохозяйственных объектов более строгие, чем для источников питьевого водоснабжения.

Целью настоящей работы является оценка влияния рыбхоза «Локтыши» на сток р. Лань.

**Описание объекта исследования.** Река Лань и ее притоки принадлежат к типу равнинных рек, для которых характерно смешанное питание с преобладанием снегового. Режим стока в годовом разрезе характеризуется высоким весенним половодьем, относительно низкой летне-осенней меженью, нарушаемой почти ежегодно дождевыми паводками, и обычно несколько повышенной водностью в зимний период за счет таяния снега в период оттепелей<sup>3</sup>.

Исток р. Лань находится в 1,5 км к западу от д. Габруны Несвижского района, протекает по территории Копыльских гряд и низины Припятское Полесье и впадает слева в р. Припять южнее д. Синкевичи Лунинецкого района. Протяженность р. Лань составляет 147 км, площадь водосбора – 2190 км<sup>2</sup>. Среднегодовой расход воды в устье – 11,3 м<sup>3</sup>/с. Общее падение реки – 79,2 м. Средний уклон водной поверхности – 0,4‰. Долина в верхнем течении корытовидная, шириной 1–1,5 км, на остальном протяжении нечеткая. Пойма низкая, шириной 0,6–1 км, изрезана мелиоративными каналами. Берега открытые, торфянистые. На период весеннего половодья приходится 55% годового стока. Максимальный уровень половодья – в марте. Средняя высота над самой низкой меженью до регулирования реки – 1,5 м, максимальная – 1,9 м (1947 г.) возле д. Локтыши Ганцевичского района. В летний период режим уровней регулируется шлюзами. Замерзает в 1-й декаде декабря, вскрывается в конце марта. Весенний ледоход длится 4 суток. Русло шириной 4–8 м, в нижнем течении – 15–20 м. Канализирована в 1973–1975 гг., зарегулировано водохранилище Локтыши (до 1975 года сток реки направлялся в р. Случь по каналу Главный, после мелиорирования – по канализированному каналу в Припять)<sup>4</sup> [1].

<sup>1</sup> Природа Беларуси // Энциклопедия : в 3 т. / редкол.: Т.В. Белова [и др.]. – Минск, 2010. – Т. 2 : Климат и вода. – 503 с.

<sup>2</sup> См. сноску 1.

<sup>3</sup> См. сноску 1.

<sup>4</sup> См. сноску 1.

Водохранилище руслового типа, сезонного регулирования «Локтыши» построено в 1977 г. по проекту РУП «Белгипроводхоз»<sup>5</sup> и предназначено для водообеспечения полносистемного рыбоводного хозяйства «Локтыши», обводнения земель, регулирования стока р. Лань. Площадь зеркала составляет 15,9 км<sup>2</sup>, площадь мелководий – 2,83 км<sup>2</sup>, длина – 6,0 км, ширина: максимальная – 4,2 км, средняя – 2,65 км, средняя глубина – 3,15 м. Объем полный – 50,2 млн м<sup>3</sup>, полезный – 29,8 млн м<sup>3</sup>. Разность отметок нормального подпорного уровня (НПУ) и уровня мертвого объема (УМО) – 2,0 м. На западе водоема берега низкие, заболоченные. На остальном протяжении водохранилище окружено дамбой. Длина береговой линии – 21 км. Площадь водосбора в створе плотины – 940 км<sup>2</sup>, расстояние от устья р. Лань до створа гидроузла – 83,0 км. Водосбор представляет собой мелковолнистую равнину с распаханностью 50%, зеленностью 16% и заболоченностью 16%. Средний годовой сток за многолетний период в створе гидроузла – 118 млн м<sup>3</sup>, за половодье – 53,5 млн м<sup>3</sup>.

ОАО «Рыбхоз «Локтыши» размещен в пойме р. Лань между деревнями Локтыши и Будча. Рыбхоз введен в эксплуатацию в 1978 году и является полносистемным прудовым хозяйством с двух- и трехлетним оборотом выращивания товарной рыбы. Основным видом деятельности является рыбоводство и рыболовство, вид разводимой рыбы – карп. Для более рационального использования прудовых площадей разводятся добавочные виды рыб – карась, щука, белый амур, толстолобик. Общая площадь прудового фонда составляет 2448,2 га, в том числе: 13 нагульных прудов общей площадью 2116 га; 15 выростных прудов площадью 263,6 га; 4 летнематочных пруда площадью 39,4 га; нерестовики площадью 6,24 га; 60 зимовальных прудов площадью 39,4 га; 24 живорыбных садка площадью 0,8 га; 2 карантинных пруда 2,0 га. Площадь каждого нагульного пруда составляет свыше 100 га. Водоснабжение прудов осуществляется из водохранилища, расположенного на реке Лань. Общая схема водных объектов в районе ОАО «Рыбхоз «Локтыши» приведена на рисунке 1.

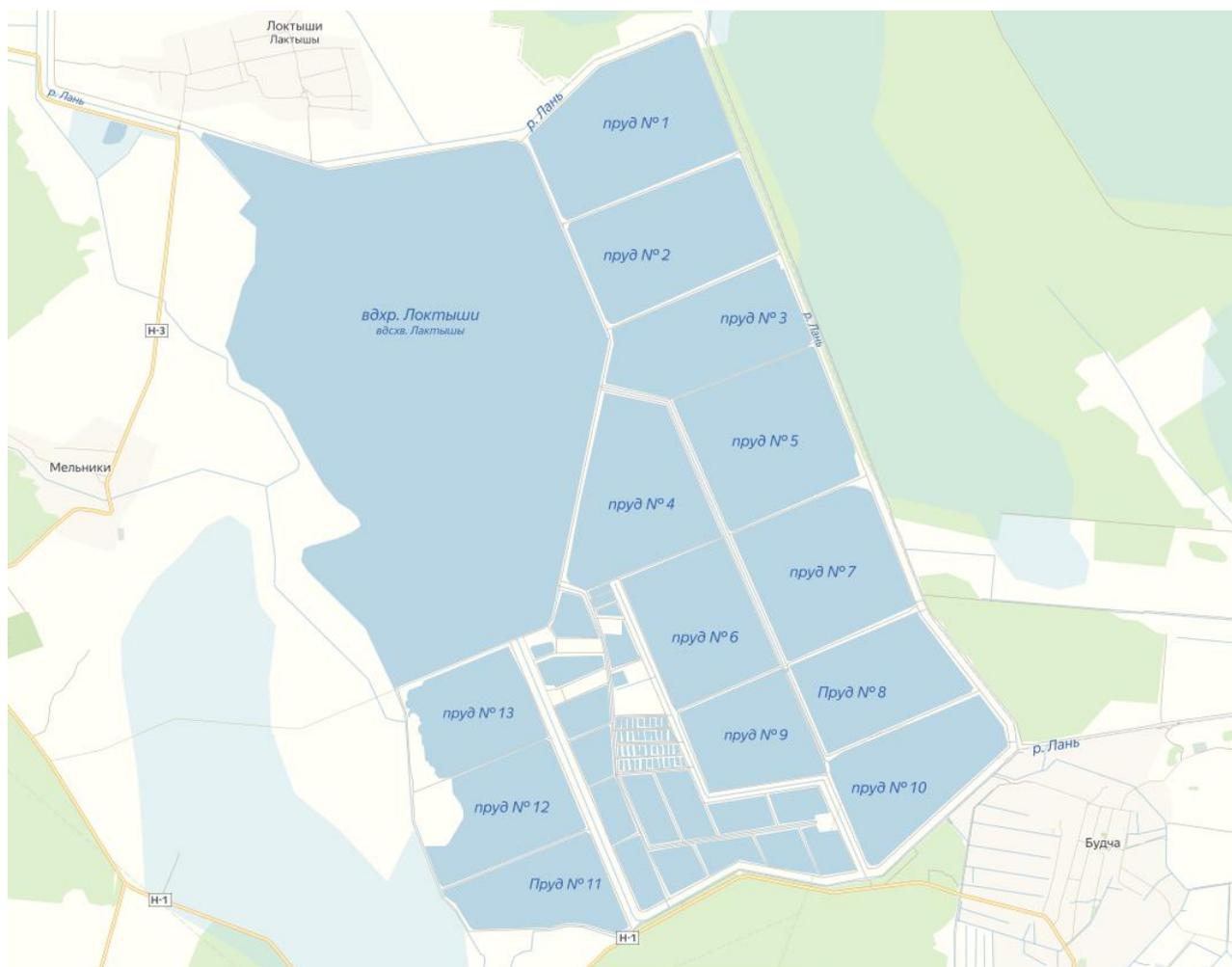


Рисунок 1. – Общая схема водных объектов в районе ОАО «Рыбхоз «Локтыши»

**Методы исследования и исходные данные.** Рекогносцировочное обследование производилось не только в пределах намеченного участка, а значительно шире. Длина участка рекогносцировочного обследования определялась местными условиями и особенностями водного объекта. Рекогносцировка участка выполнялась во время

<sup>5</sup> Водохранилища Беларуси // Справочник / М-во природных ресурсов и охраны окружающей среды ; РУП «Центральный науч.-исслед. ин-т комплексного использования водных ресурсов» ; М.Ю. Калинин [и др.]. – Минск, 2005. – 183 с.

летней межени, когда наилучшим образом можно охарактеризовать рельеф русла, поймы и берегов, растительность, грунты и т.п. Характеристика состояния реки в половодье и зимний период выявлялась путем опроса местного населения.

Уклоны водной поверхности определялись нивелированием IV класса, двойным ходом от репера поста, а сам уклон вычисляется по формуле:

$$I = \frac{H_B - H_H}{L}, \quad (1)$$

где  $H_B, H_H$  – отметки уровня воды соответственно в верхнем и нижнем створах, м;  
 $L$  – расстояние между уклонными постами, м.

Измерения глубин в створах с точностью до 1 см производились для составления поперечных и продольных профилей. В связи с тем, что уровень воды является величиной динамической, глубины, измеряемые в разное время, имеют различное значение. Для устранения этих различий при обработке материалов измерений глубины приводились к одному расчетному (условному) уровню, соответствующему определенному моменту времени.

Для измерения скоростей течения воды в реке использовалась гидрометрическая вертушка ГР-55 и гидрометрические поплавки, которые применялись в случаях, где невозможно использование гидрометрических вертушек из-за малой глубины и помех в потоке.

В гидрометрическом створе намечались скоростные вертикали в отдельных точках, в которых измерялись скорости течения. При определении скорости течения в основном использован детальный способ, т.е. скоростные вертикали назначались через равные промежутки по ширине реки – через одну промерную вертикаль. Измерения скорости течения на вертикали производились при свободном от водной растительности русле в следующих пяти точках по глубине вертикали: у поверхности, на  $0,2h$ , на  $0,6h$ , на  $0,8h$  и у дна.

Вычисление средней скорости на вертикали при открытом, не заросшем водной растительностью русле осуществляется по следующей формуле [2; 3]:

$$V_{cp} = 0,05 \cdot V_{нов} + 0,347 \cdot (V_{0,2} + V_{0,6}) + 0,173 \cdot V_{0,8} + 0,083 \cdot V_{дн}. \quad (2)$$

Из-за изменчивости гидравлических элементов во времени и пространстве расход воды не поддается прямым измерениям. Его значения получают в результате косвенных измерений элементов: расстояний, глубин и скоростей потока. На их основе расходы воды могут быть вычислены по следующей модели:

$$Q = \sum_{i=0}^N 0,5(V_i + V_{i+1}) \cdot f_{i+1}, \quad (3)$$

где  $V_i, V_{i+1}$  – проекция средних скоростей на граничных вертикалях;  
 $f_{i+1}$  – площадь между вертикалями.

Достоинство модели (3) перед другими подобными моделями в том, что она допускает различную степень дискретизации поля скоростей и глубины: количество промерных вертикалей, как правило, назначается в 2–3 раза больше, чем скоростных, кроме того, она дает более точные результаты [2; 3].

Вычисление расхода воды аналитическим способом производилось в следующей последовательности [2; 3]:

1. Определялась площадь отсеков между скоростными вертикалями  $f_i$  посредством планиметрирования частей поперечного профиля или аналитическим методом трапеций по формуле:

$$f_j = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{N_{j-1}} (h_{i,j} + h_{i+1,j}) \cdot b_{i,j}, \quad (j = 0, n), \quad (4)$$

где  $h_{i,j}$  – глубина воды на  $i$ -ой вертикали  $j$ -го отсека;  
 $N_{j-1}$  – количество промерных вертикалей в отсеке;  
 $b_{j,i}$  – ширина между промерными вертикалями в  $j$ -ом отсеке.

2. Вычислялась средняя скорость на вертикали по формуле (2).

3. По рабочим глубинам всех промерных вертикалей со срезкой на расчетный уровень определялись площади живого сечения между скоростными вертикалями.

4. Средняя скорость  $V_{j,s}$  в отсеке между скоростными вертикалями вычислялась как:

$$V_{j,s} = 0,5(V_j + V_{j+1}), \quad (j = 0, n). \quad (5)$$

Частные расходы  $q_j$  находят как произведение  $V_j f_j$ , а полный расход как

$$Q = \sum_{j=0}^{n+1} q_j. \quad (6)$$

Таким образом, расчетная формула для полного расхода через все живое сечение приобретает вид:

$$Q = k V_i f_0 + 0,5 \sum_{j=1}^{n-1} (V_j + V_{j+1}) \cdot f_j + k^1 V_n \cdot f_n. \quad (7)$$

Ниже представлены результаты промерных работ, вычисленные скорости течения и расходы воды в расчетных створах реки. Построены поперечные профили рассматриваемой реки.

**Алгоритм математической модели уровней и расходов.** Чтобы узнать среднюю глубину потока и скорость для определения расходов воды различной обеспеченности в отдельном створе, решались две отдельные задачи:

- измерить основные характеристики потока;
- определить водность года исследуемого водотока на текущий момент времени.

По результатам стандартных гидрометрических работ определялись отметки характерных точек русла, на основе которых строился поперечный профиль русла, и вычислялись площадь поперечного сечения ( $\omega$ ), смоченный периметр ( $\chi$ ) и гидравлический радиус ( $R$ ) для различной глубины наполнения по следующим формулам:

$$\omega = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (x_i (y_{i+1} - y_{i-1})), \quad (8)$$

$$\chi = \sum_{i=1}^{n-1} \sqrt{(x_i - x_{i+1})^2 + (y_i - y_{i+1})^2}, \quad (9)$$

$$R = \frac{\omega}{\chi}, \quad (10)$$

где  $x_i$  и  $y_i$  – координаты  $i$ -той точки рассматриваемого многоугольника (рисунок 2), м;  
 $n$  – количество точек многоугольника.

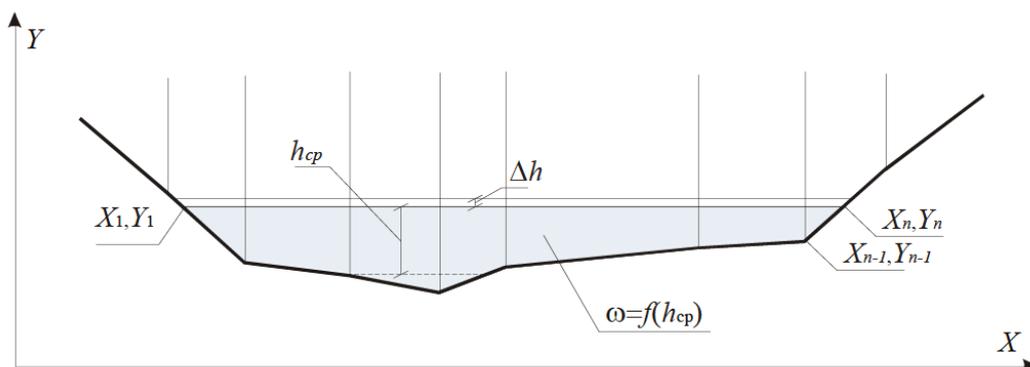


Рисунок 2. – Схема численной обработки данных промерных работ

Таким образом, задаваясь приращением глубины  $\Delta h$ , имеется возможность построить зависимость площади поперечного сечения  $\omega$  и средней глубины  $h_{cp}$ . Приращение глубины принимается в зависимости от выраженности рельефа дна водотока, но рекомендуется принимать количество итераций  $\tau > 25$ , тогда  $\Delta h = \frac{Y_{\max} - Y_{\min}}{\tau}$ .

Аналогично определяется зависимость смоченного периметра  $\chi$  и гидравлического радиуса  $R$ .

Используя полученные массивы  $[\omega, h_{cp}]$  и  $[R, h_{cp}]$ , выполняется оценка параметров регрессионной модели вида

$$z = \alpha \cdot h_{cp}^2 + \beta \cdot h_{cp} + \varphi, \quad (11)$$

где  $z$  – прогнозируемый геометрический параметр русла;  
 $\alpha, \beta, \varphi$  – константы регрессионного уравнения.

С помощью определения зависимости площади живого сечения от средней глубины в форме функции вида (11) находится численное решение уравнения Шези по средней глубине потока

$$Q_{P\%} = \omega_{P\%} C_{P\%} \sqrt{R_{P\%} i}, \quad (12)$$

где  $C_{P\%}$  – коэффициент Шези,  $m^{0.5}/c$ ;

$i = i_0$  – гидравлический уклон, при равномерном установившемся движении можно принять как средний уклон дна водотока (первое допущение).

Выполнив некоторые преобразования, получим из уравнения (12) систему уравнений

$$\begin{cases} Q_{P\%} = \omega_{P\%} C_{P\%} \sqrt{R_{P\%} i} \\ \omega_{P\%} = \alpha_{\omega} \cdot h_{cp P\%}^2 + \beta_{\omega} \cdot h_{cp P\%} + \varphi_{\omega} \\ R_{P\%} = \alpha_R \cdot h_{cp P\%}^2 + \beta_R \cdot h_{cp P\%} + \varphi_R \\ C_{P\%} = \frac{R_{P\%}^{2,5\sqrt{n}-0,13-0,75\sqrt{R_{P\%}}} (\sqrt{n}-0,1)}{n} \end{cases} \quad (13)$$

Так как в уравнении (13) количество неизвестных больше, чем количество уравнений, то предполагаем (второе допущение), что измеренные значения гидравлических характеристик стока  $Q_{ИЗМ}$ ,  $R_{ИЗМ}$ ,  $\omega_{ИЗМ}$ ,  $C_{ИЗМ}$ ,  $i$  и искомая средняя глубина воды заданной обеспеченности относятся к одному гидрологическому сезону.

Исходя из этого, шероховатость русла водотока определяется по формуле Н.Н. Павловского:

$$C_{ИЗМ} = \frac{R_{ИЗМ}^{2,5\sqrt{n}-0,13-0,75\sqrt{R_{ИЗМ}}} (\sqrt{n}-0,1)}{n}, \quad (14)$$

где  $C_{ИЗМ} = \frac{Q_{ИЗМ}}{\omega_{ИЗМ} \sqrt{R_{ИЗМ} i}}$  – коэффициент Шези, определяемый на основе измеренных значений расхода и параметров поперечного сечения русла водотока, м<sup>0,5</sup>/с.

Формула Н.Н. Павловского принята как наиболее устойчивая в условиях малых значений гидравлического радиуса.

Стоит отметить, что при численном решении уравнения (13) необходимо учитывать границы применимости регрессионных уравнений, то есть решение данного уравнения должно находиться в пределах  $0 < h_{cp P\%} < h_{cp \max}$ , так как экстраполяция данных зависимостей может привести к ошибочным результатам.

Для определения водности текущего года подбирается река-аналог, имеющая длинный ряд наблюдений за гидрологическим режимом. Как показал предварительный анализ, водность года с высокой достоверностью аппроксимации ( $r > 0,75$ ) определяют месяцы, предшествующие расчетному. При определении параметров функции распределения (трехпараметрическое гамма-распределение) применялся метод наибольшего правдоподобия.

**Определение основных гидрологических характеристик рек.** Согласно ТКП 45-3.04-168-2009, определение расчетных гидрологических характеристик должно основываться на данных гидрометеорологических наблюдений, в том числе регулярных наблюдений последних лет, опубликованных в специальных документах в области гидрологии; дополнительно должны учитываться данные инженерно-гидрометеорологических изысканий<sup>6</sup>. В связи с тем, что на р. Лань в створе д. Мокрово ведутся регулярные гидрологические наблюдения Республиканским центром по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды, то определение расчетных гидрологических характеристик осуществлялось непосредственно по данным гидрологических наблюдений с учетом требований, изложенных в [4]. В настоящей работе использованы данные гидрометрических наблюдений за период с 1954 по 2018 гг., т.е. 65 лет, что достаточно для получения объективных статистических гидрологических характеристик по р. Лань в створе д. Мокрово.

**Методика определения экологического стока рек.** Разработанная нами методика определения детально изложена в работах<sup>7</sup> [5]. Остановимся вкратце на ее сути. Экологический сток – это то количество воды, которое должно оставаться в реке для обеспечения условий существования гидробионтов с одновременным сохранением ее необходимого качества. В этом случае сохраняются экосистемы пойм, а река остается элементом ландшафта. Таким образом, экологический сток обеспечивает количественное и качественное состояние водного объекта в самый маловодный период года.

Существующие подходы определения экологического стока регламентируют только минимальное значение стока реки. При этом отсутствует определение экологического стока при различных обеспеченностях. Наиболее эффективным способом определения экологического стока с учетом внутригодового распределения является способ повышения обеспеченности. Поэтому он использован в данной работе.

Непосредственно на р. Лань нет значимых по влиянию на гидрологический режим реки и гидрогеологический режим прибрежных территорий гидротехнических сооружений, за исключением водопропускных устройств ОАО «Рыбхоз «Локтыши», включая водохранилище Локтыши и пруды.

**Результаты исследования и их обсуждения.** Для количественной оценки влияния рыбхоза «Локтыши» на сток р. Лань 21.06.2021 г. нами выполнены гидрометрические измерения расхода воды в створах, расположенных выше забора воды и ниже точки сброса от рыбхозов. При выборе гидрометрических створов для проведения

<sup>6</sup> Расчетные гидрологические характеристики. Порядок определения : ТКП 45-3.04-168-2009 (02250). – Введ. 01.07.10. – Минск : Стройтехнорм, 2010. – 55 с.

<sup>7</sup> Волчек, А.А. Оценка экологического стока реки Ясельда в створе водохранилища «Селец» / А.А. Волчек, Н.Н. Шешко // Современные проблемы очистки сточных вод и охраны ресурсов поверхностных вод в приграничье : материалы междунар. науч.-практ. конф., Брест, 24–25 сент. 2015 г. / Под ред. Н.В. Михальчук. – Брест, 2015. – С. 12–22.

измерений на реке руководствовались следующими двумя основными условиями: режим реки в выбранном месте должен быть характерным по возможности для большого участка реки; выбранный участок должен быть удобен для наблюдений, обеспечивая наибольшую возможную их точность в данных условиях.

Выбору расчетных створов предшествовал всесторонний анализ района изысканий на основании литературных данных, архивных материалов и других источников, а также рекогносцировочное обследование реки. В результате были выявлены основные черты гидрологического режима реки (характер колебаний уровня, расход и мутность, гидрографические и морфометрические характеристики участка), а также современное состояние и перспективы развития водного хозяйства, наличие знаков геодезической сети, высотных реперов, пунктов триангуляции и полигонометрии, современное состояние путей сообщения и средств связи.

По результатам предварительного анализа было намечено два гидрометрических створа, после чего производилась рекогносцировка местности и окончательный выбор участка. Верхний створ расположен около 0,5 км на восток от д. Начь, которая располагается на северо-востоке Ганцевичского района Брестской области (рисунок 3).

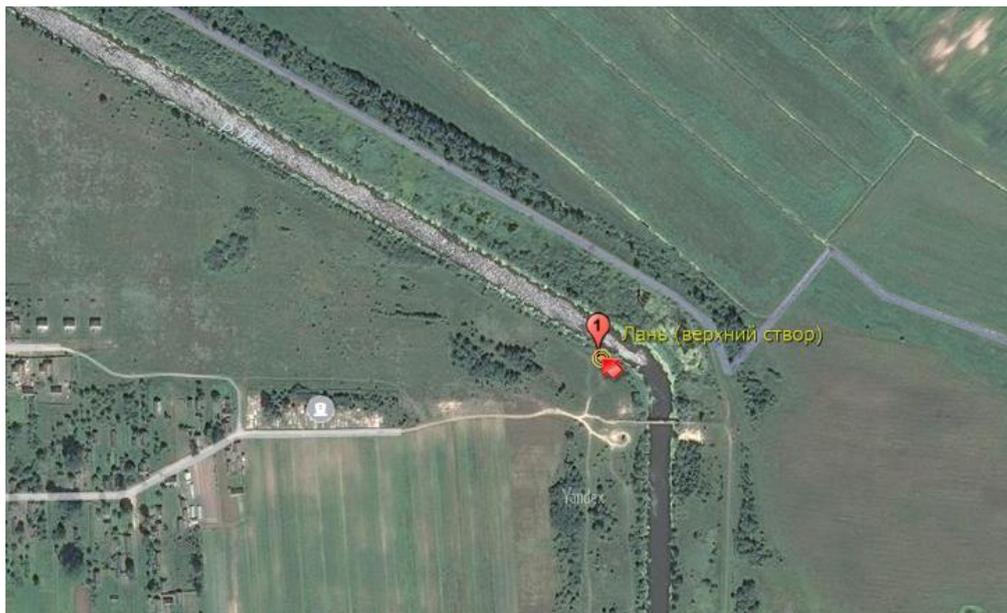


Рисунок 3. – Карта-схема расположения верхнего створа

Русло реки на протяжении створа прямое. Его ширина в пределах створа составила 28 м. Берега в пределах створа песчаные, покрыты преимущественно кустарниковой и травяной растительностью. Левый берег пологий, тогда как правый более обрывистый высотой около 1–2 м и выстлан песчаными породами. В пределах русла имелось незначительное количество водной растительности, не оказывающей существенного влияния на течение. Речное дно песчаное (рисунок 4).



Рисунок 4. – Участок исследования в верхнем створе

По результатам промеров глубин в верхнем створе построен поперечный профиль р. Лань (рисунок 5) и определены основные характеристики на момент изысканий: расход воды  $Q = 1,19 \text{ м}^3/\text{с}$ ; площадь поперечного сечения  $F = 36,72 \text{ м}^2$ ; ширина реки по урезу воды  $B = 28,3 \text{ м}$ ; средняя глубина потока  $h_{\text{ср}} = 1,30 \text{ м}$ ; средняя скорость течения воды  $V_{\text{ср}} = 0,03 \text{ м/с}$ ; максимальная скорость  $V_{\text{max}} = 0,08 \text{ м/с}$ ; уклон водной поверхности  $i_{\text{пов}} = 0,099\%$ .

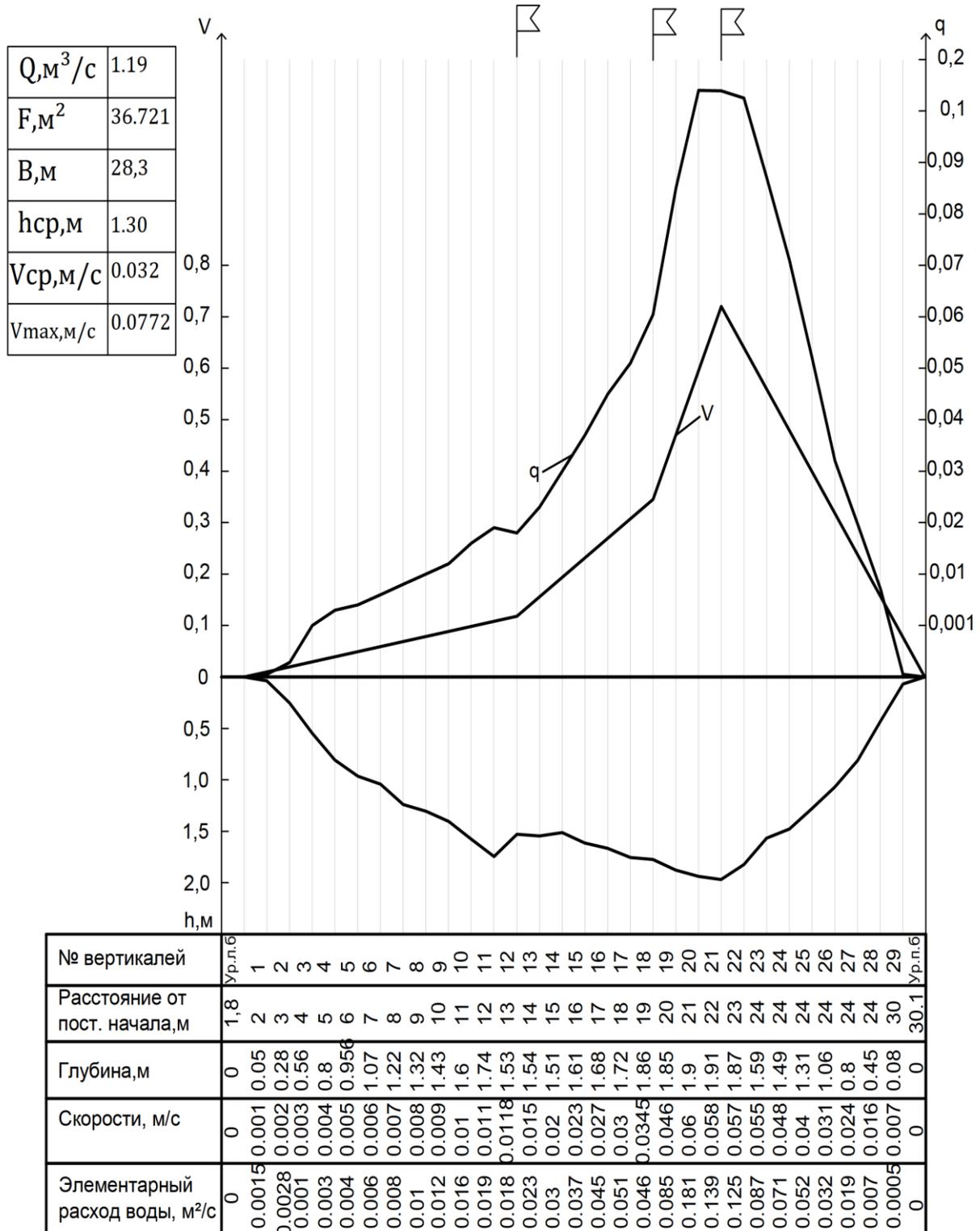


Рисунок 5. – Поперечный профиль реки Лань в верхнем створе

Нижний створ расположен на северо-востоке Ганцевичского района (на границе Ганцевичского и Клецкого районов) в 1,5 км на северо-восток от д. Будча Ганцевичского района Брестской области (рисунок 6).



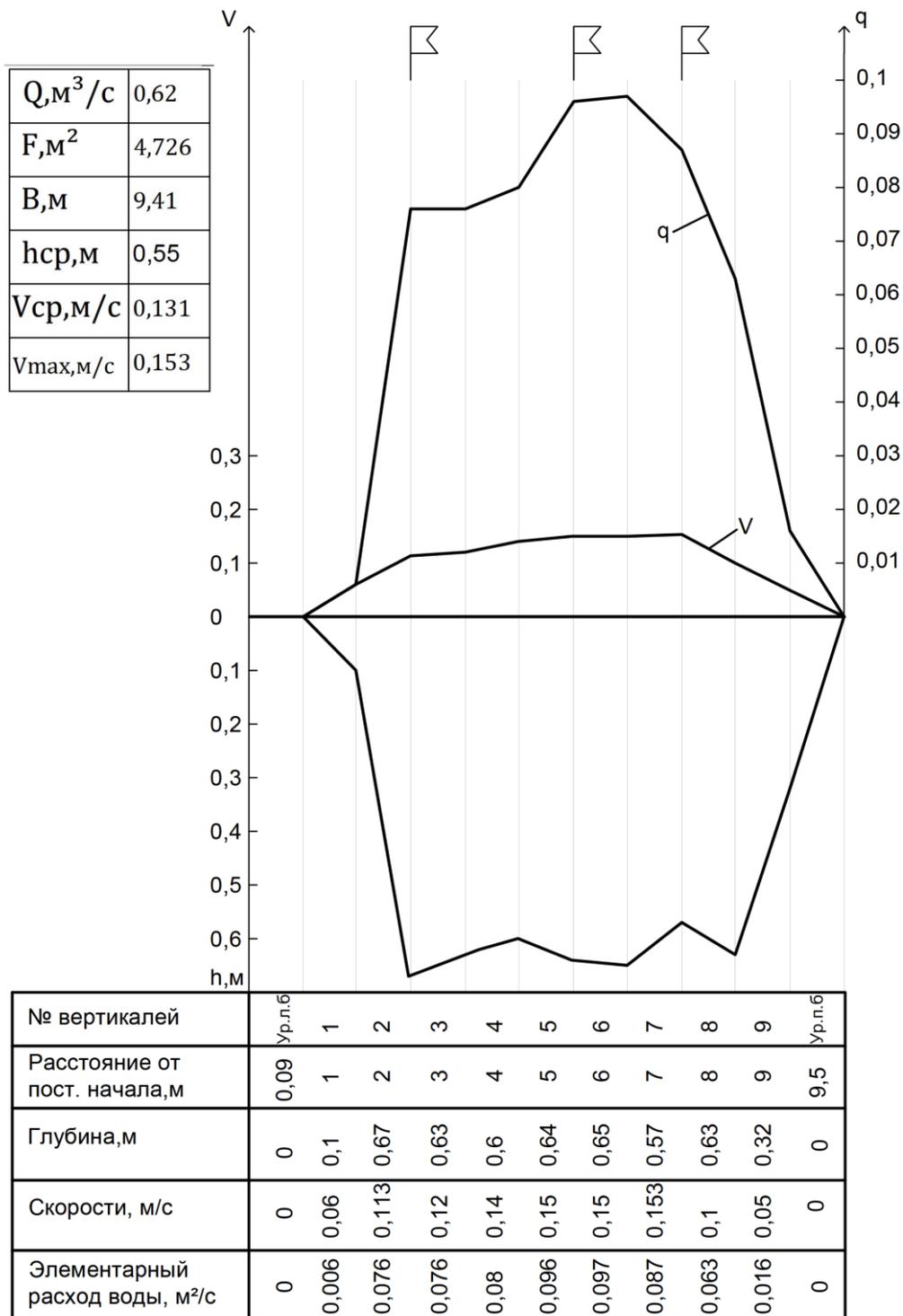


Рисунок 8. – Поперечный профиль реки Лань в нижнем створе

По результатам сравнительного анализа исследуемых створов выявлено значительное их различие как в количественных характеристиках, так и в геометрических размерах. Из количественных характеристик обращает на себя внимание снижение расхода воды в нижнем створе  $\Delta Q = -0,57 \text{ м}^3/\text{с}$ . Это вызвано дополнительным испарением воды с поверхности водохранилища и рыбоводных прудов, а также регулированием сбросных расходов воды из водохранилища.

Верхний створ находится в подпоре со стороны водохранилища «Локтыши», что вызвало увеличение площади поперечного сечения по сравнению с нижним створом  $\Delta F = 31,99 \text{ м}^2$  и ширины потока  $B = 18,89 \text{ м}$ , и как следствие, увеличением уклона водной поверхности в нижнем створе на величину  $i_{\text{пов}} = 0,162\%$ , что привело к увеличению скорости течения воды в нижнем створе, средней на  $V_{\text{ср}} = 0,10 \text{ м}/\text{с}$  и максимальной на  $V_{\text{max}} = 0,08 \text{ м}/\text{с}$ .

По результатам обработки данных гидрометрических измерений по методике, описанной выше, и работы [6] получены математические модели (расходы/уровни/скорости) и кривые связи скорости/расхода и уровня воды в створе.

$$V = \alpha \cdot h_{\text{ср}}^3 + \beta \cdot h_{\text{ср}}^2 + \gamma \cdot h_{\text{ср}}, \quad (15)$$

где  $h_{\text{ср}}$  – средняя глубина в расчетном створе, м;

$\alpha, \beta, \gamma$  – эмпирические коэффициенты, значения которых приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Значения эмпирических коэффициентов

Створ	Параметр	Эмпирические коэффициенты			
		$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	R
Верхний	$V, \text{ м/с}$	-0,0085	0,0302	$-0,09 \cdot 10^{-4}$	0,97
	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	0,4851	0,1076	-0,0399	0,99
Нижний	$V, \text{ м/с}$	-0,0244	-0,0203	0,2771	0,98
	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	2,3585	0,9747	0,0992	0,99

В качестве особенности следует отметить, что применение кривых связи допустимо только в пределах установленного диапазона. Применение экстраполяции допустимо, однако может приводить к значительным отклонениям и погрешностям.

Данные, полученные при расчете экологического стока реки, позволили определить величины допустимого изъятия поверхностных вод из реки с учетом потерь на испарение с водного зеркала и фильтрации из водохранилища. Результаты расчетов при условии обеспечения сохранения реке экологического стока с учетом внутригодового распределения для различных вероятностей превышения (обеспеченностей) приведены ниже. Анализ гидрологических характеристик р. Лань проведен на расчетном участке реки ниже рыбхоза «Локтыши». Данные о количественных характеристиках стока р. Лань по месяцам и в годовом разрезе представлены в таблице 2.

Таблица 2. – Внутригодовое распределение стока реки Лань в средний по водности год

Интервалы осреднения												
январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь	Год
Расход, м <sup>3</sup> /с												
3,31	3,36	4,96	5,65	3,07	2,10	1,86	1,99	2,71	2,93	2,83	2,80	3,11
Коэффициент вариации, $C_v$												
0,61	0,47	0,56	0,61	0,52	0,59	0,56	0,64	0,39	0,47	0,52	0,50	0,28
Коэффициент асимметрии, $C_s$												
1,37	0,40	1,57	2,18	1,10	0,70	0,87	1,54	-0,09	2,63	1,95	1,12	0,24
Коэффициент автокорреляции, $r(1)$												
0,01	0,14	0,09	0,20	0,05	0,01	-0,16	-0,20	0,06	-0,15	0,00	0,03	0,25

Анализ внутригодового распределения стока р. Лань в створе д. Локтыши по месяцам показал, что на весенний период приходится 36% от годового стока, зимний сток составляет 25% от годового, на летне-осенний сезон приходится 38% от годового стока. Отличие от типового распределения стока рек Белорусского Полесья вызвано зарегулированностью стока водохранилищем.

**Минимальные среднемесячные расходы воды 95% обеспеченности.** Характеристики минимального стока являются расчетными при гидрологическом обосновании различных водохозяйственных и водоохранных проектов, а именно: проектирование гидростанций для выработки энергии, водоснабжение городов, сельских населенных пунктов, водного транспорта, рыбного хозяйства. В практике водохозяйственного проектирования основное применение находят величины минимального стока обеспеченностей в диапазоне 75–99%, характеризующие годы с маловодной меженью сравнительно редкой повторяемости. При оценке наихудших условий для формирования качества воды обычно используется минимальный сток 95% обеспеченности (средняя повторяемость 1 раз в 20 лет), что является достаточно произвольным условием, требующим дифференциации в зависимости от тяжести негативных экологических и санитарно-технических последствий.

В таблице 3 приведены результаты расчета минимальных среднемесячных расходов воды 95% вероятности превышения (обеспеченности) с учетом внутригодового распределения стока.

Таблица 3. – Минимальные среднемесячные расходы воды 95% обеспеченности с учетом внутригодового распределения стока реки Лань, млн м<sup>3</sup>

Интервалы осреднения												
январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь	Год
4,19	6,26	9,66	7,09	4,30	3,89	1,81	2,61	3,38	4,11	5,17	3,37	55,85

**Экологический сток рек в различные по водности годы.** Рассмотрим определение экологического стока р. Лань в створе деревни Будча. Расчетный период принят с 1954 по 2018 гг. Наиболее эффективно описывает исходные данные функция плотности распределения случайной величины Крицкого – Менкеля. Решая уравнения, получаем две функции плотности распределения экологического стока.

Учитывая результаты проведенных натурных исследований и используя метод переноса обеспеченностей, нами проведены гидрологические расчеты по определению экологического стока р. Лань с учетом внутригодового распределения стока для различных вероятностей превышения (обеспеченностей), результаты которых приведены в таблицах 4, 5.

Таблица 4. – Экологический сток с учетом внутригодового распределения, м<sup>3</sup>/с/млн м<sup>3</sup>

Интервалы осреднения												
январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь	Год
95% вероятности превышения (обеспеченности)												
<u>1,30</u> 3,42	<u>1,94</u> 5,10	<u>3,00</u> 7,88	<u>2,20</u> 5,79	<u>1,33</u> 3,51	<u>1,21</u> 3,18	<u>0,56</u> 1,48	<u>0,81</u> 2,13	<u>1,05</u> 2,76	<u>1,28</u> 3,35	<u>1,60</u> 4,21	<u>1,05</u> 2,75	<u>1,44</u> 45,55
75% вероятности превышения (обеспеченности)												
<u>1,86</u> 4,90	<u>2,78</u> 7,31	<u>4,29</u> 11,28	<u>3,15</u> 8,28	<u>1,91</u> 5,02	<u>1,73</u> 4,55	<u>0,80</u> 2,11	<u>1,16</u> 3,05	<u>1,50</u> 3,95	<u>1,83</u> 4,80	<u>2,30</u> 6,03	<u>1,50</u> 3,94	<u>2,07</u> 65,22
50% вероятности превышения (обеспеченности)												
<u>2,31</u> 6,08	<u>3,45</u> 9,06	<u>5,33</u> 14,00	<u>3,91</u> 10,28	<u>2,37</u> 6,23	<u>2,15</u> 5,64	<u>1,00</u> 2,62	<u>1,44</u> 3,79	<u>1,86</u> 4,90	<u>2,27</u> 5,96	<u>2,85</u> 7,48	<u>1,86</u> 4,89	<u>2,57</u> 80,91
5% вероятности превышения (обеспеченности)												
<u>3,21</u> 8,44	<u>4,79</u> 12,58	<u>7,40</u> 19,43	<u>5,43</u> 14,27	<u>3,29</u> 8,65	<u>2,98</u> 7,83	<u>1,39</u> 3,64	<u>2,00</u> 5,26	<u>2,59</u> 6,80	<u>3,15</u> 8,27	<u>3,95</u> 10,39	<u>2,58</u> 6,79	<u>3,56</u> 112,3

Таблица 5. – Величины допустимого изъятия поверхностных вод из реки с учетом сохранения экологического стока, млн м<sup>3</sup>

Интервалы осреднения												
январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь	Год
95% вероятности превышения (обеспеченности)												
0,75	1,13	1,76	1,09	0,20	0,00	0,00	0,00	0,14	0,51	0,85	0,60	7,04
75% вероятности превышения (обеспеченности)												
0,97	1,45	2,25	1,46	0,42	0,13	0,00	0,00	0,31	0,72	1,12	0,77	9,59
50% вероятности превышения (обеспеченности)												
1,13	1,70	2,63	1,73	0,58	0,28	0,00	0,00	0,45	0,88	1,32	0,90	11,61
5% вероятности превышения (обеспеченности)												
2,03	3,03	4,70	3,25	1,50	1,11	0,06	0,53	1,17	1,76	2,43	1,63	23,19

**Заключение.** Проведена комплексная оценка воздействия рыбхоза «Локтыши», расположенного в бассейне р. Лань в районе д. Будча, на гидрологический режим реки для повышения эффективности управления водными ресурсами с учетом обеспечения экологического функционирования водных объектов, в ходе которой решены следующие задачи:

- выполнен анализ гидрологического режима расчетных участков реки, используемых для нужд рыбхоза и расположенных в бассейне р. Лань, установлен репрезентативный период для расчета гидрологических характеристик, который составляет 65 лет и принят с 1954 по 2018 гг., определены основные гидрологические характеристики;
- проведены натурные исследования участков реки, в ходе которых заложены створы выше и ниже участка забора воды для нужд рыбхоза. Построены поперечные профили. Для створов рассчитаны гидрологические характеристики, которые включают в себя распределение в поперечных сечениях водотоков местных продольных осредненных скоростей течения воды и расходов воды. Проведенные натурные исследования позволили определить расходы воды на исследуемых участках выше и ниже рыбхозов в период исследований;
- выполнены гидрологические расчеты по определению минимальных среднемесячных расходов воды 95% вероятности превышения (обеспеченности) и экологического стока с учетом внутригодового распределения стока различной обеспеченности;
- разработаны математические модели для участков, расположенных ниже и выше рыбхоза, позволяющие в зависимости от средней глубины воды в створе определить скорости течения и расходы воды;
- оперативные гидравлические расчеты с целью оценки воздействия заборов воды рыбхозом на изменение гидрологического режима водных объектов (глубин воды, скоростей течения и расходов воды) осуществляются на основе разработанных математических моделей как разницы расчетных параметров для заложённых створов ниже и выше рыбхозов;

– определены математические зависимости для глубины, скорости течения и расходы воды в исследуемых створах ниже рыбхозов, соответствующих экологическому стоку, с использованием результатов гидрологических расчетов и математических моделей водных объектов;

– определены величины допустимого изъятия поверхностных вод из реки, используемых для нужд рыбхозов, с учетом потерь на испарение с водного зеркала и фильтрации из водохранилищ и прудов, при обеспечении условия сохранения в реках экологического стока, что позволит определить наиболее эффективный режим наполнения рыбоводческих прудов.

Управление водными ресурсами р. Лань должно быть основано на их накоплении в многоводные периоды с целью последующей минимизации изъятия воды в маловодные и в очень маловодные периоды. В маловодные и в очень маловодные периоды могут быть организованы дополнительные попуски с использованием накопленных объемов воды с целью обводнения р. Лань для улучшения гидрологического режима реки и ее прибрежных территорий.

Кроме того, в жаркие засушливые периоды за счет большой площади водных объектов в районе ОАО «Рыбхоз «Локтыши» в 40,38 км<sup>2</sup> (включая площадь водохранилища и прудового фонда) из-за дополнительного испарения с водной поверхности и дополнительного изъятия из реки для компенсации указанного испарения может происходить существенное снижение стока р. Лань ниже по течению. Поэтому накопление избыточных водных ресурсов в водохранилище Локтыши и в водных объектах ОАО «Рыбхоз «Локтыши» в многоводные периоды, включая половодья и паводки, с организацией попусков в засушливые периоды с учетом минимального необходимого санитарного попуска позволит обеспечить возможность для поддержания оптимального гидрологического режима р. Лань.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Волчек, А.А. Сток реки Лань: современное состояние и прогноз / А.А. Волчек // Гидрометеорология и экология. – 2021. – № 2. – С. 6–22.
2. Гидравлика, гидрология, гидрометрия : учеб. пособие / А.А. Волчек [и др.] ; под общ. ред. А.А. Волчека. – М. : КНОРУС, 2021. – 520 с. – Бакалавриат и магистратура.
3. Учебная гидрометрическая практика : учеб. пособие / А.А. Волчек [и др.] ; под ред. А.А. Волчека. – Минск : РИВШ, 2020. – 260 с.
4. Волчек, А.А. Гидрологические расчеты : учеб. пособие / А.А. Волчек. – М. : КНОРУС, 2021. – 418 с.
5. Оценка влияния рыбхоза «Селец» на сток реки Ясельда / А.А. Волчек [и др.] // Вестн. Брестского гос. техн. ун-та. Сер. Геоэкология. – 2022. – № 1. – С. 86–96. DOI: 10.36773/1818-1112-2022-127-1-86-96.
6. Статистические методы в природопользовании : учеб. пособие для вузов / В.Е. Валуев [и др.]. – Брест : БПИ, 1999. – 252 с.

#### REFERENCES

1. Volchek, A.A. (2021). Stok reki Lan': sovremennoe sostoyanie i prognoz [River Lan discharge: current state and forecast]. *Gidrometeorologiya i ekologiya*, (2), 6–22. (In Russ., abstr. in Engl.).
2. Volchek, A.A., Volchek, A.A., Shvedovskii, P.V. & Sheshko, N.N. (2021). *Gidravlika, gidrologiya, gidrometriya*. Moscow: KNORUS. (In Russ.).
3. Volchek, A.A., Volchek, A.A., Meshik, O.P., Moroz, M.F., Sarkynov, E.S. & Zulpykharov, B.A. (2020). *Uchebnaya gidrometricheskaya praktika*. Minsk: RIVSh. (In Russ.).
4. Volchek, A.A. (2021). *Gidrologicheskie raschety*. Moscow: KNORUS. (In Russ.).
5. Volchek, A.A., Parfomuk, S.I., Sheshko, N.N., Shpendik, N.N., Dashkevich, D.N., Sidak, S.V. & Kukharevich, M.F. (2022). Otsenka vliyaniya rybkhoza «Selets» na stok reki Yasel'da [Assessment of the Selets Fish Farm Impact on the Yaselda River Runoff]. *Vestn. Brestskogo gos. tekhn. un-ta. Ser. Geoekologiya [Vestnik of Brest State Technical University. Geoecology]*, (1), 86–96. (In Russ., abstr. in Engl.).
6. Valuev, V.E., Volchek, A.A., Poita, P.S. & Shvedovskii, P.V. (1999). *Statisticheskie metody v prirodoopol'zovanii*. Brest: BPI. (In Russ.).

Поступила 04.05.2022

#### ASSESSMENT OF THE LOKTYSHI FISH FARM IMPACT ON THE LAN RIVER RUNOFF

**A. VOLCHAK, S. PARFOMUK, N. SHESHKO, N. SHPENDIK,  
D. DASHKEVICH, S. SIDAK, M. KUKHAREVICH**

*A comprehensive assessment of the impact of the Loktyshi fish farm located in the Lan River basin in the area of the Budcha village on the hydrological regime of the river was carried out. The values of permissible withdrawal of surface water from the river used for the needs of fish farms are determined taking into account evaporation losses from the water mirror and filtration from reservoirs and ponds, while ensuring the conditions for preserving ecological runoff in rivers. It will allow determining the most effective filling regime for fish ponds.*

**Keywords:** fish farming, eutrophication, reconnaissance survey, ecological runoff, water consumption, mathematical model, water content of the year, transverse profile, upper section line, lower section line.

## ГЕОДЕЗИЯ

УДК 528.7

DOI 10.52928/2070-1683-2022-31-8-124-127

## ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ФОТОПЛАНОВ

канд. техн. наук, доц. А.А. МИХЕЕВА,  
канд. техн. наук, доц. В.В. ЯЛТЫХОВ,  
П.Ф. ПАРАДНЯ  
(Полоцкий государственный университет)

При использовании аналоговых аэрофотоаппаратов фотопланы монтировались из трансформированных снимков. Если превышения точек местности позволяли получить допустимые искажения за рельеф, то трансформировали в одну зону. Иначе трансформирование выполняли по зонам, допуская смещения в каждой зоне не более 0,4 мм. В соседних зонах смещения на границе зон имели противоположные направления и расхождение между контурами могло достигать 0,8 мм. За окончательное положение контура принималось его среднее значение, что компенсировало ошибки положения в соседних зонах.

При создании цифровых фотопланов и ортофотопланов для учета искажений за рельеф используют цифровые модели рельефа (ЦМР). Технология цифрового трансформирования не предусматривает использование зон трансформирования и, следовательно, не будут компенсироваться ошибки, как при трансформировании по зонам. Качество ортофотоплана будет зависеть от точности ЦМР. Цифровая модель рельефа или поверхности имеет высокую плотность и позволяет учесть искажения за рельеф значительно точнее, чем при трансформировании по зонам.

В работе выполнен анализ требований действующих нормативных документов при создании цифровых фотопланов и ортофотопланов, приведены соответствующие выводы и рекомендации.

**Ключевые слова:** ортофотоплан, Agisoft Photoscan, цифровая модель рельефа, точность ЦМР, зона трансформирования.

**Введение.** Фотопланы на бумажной основе создавались из трансформированных изображений всех перекрывающихся снимков. В ходе трансформирования реальные снимки преобразовывали в горизонтальные снимки заданного масштаба. Смещения, обусловленные рельефом местности  $\delta_h$ , не устранялись, можно было изменить только их величину.

В соответствии с требованиями инструкций<sup>1234</sup> средняя ошибка при создании (обновлении) топографических карт и планов при отображении капитальных строений не должна превышать 0,4 мм на карте (плане).

**Основная часть.** Предельные превышения  $h_{\max}$ , при которых получим допустимые искажения (смещения) за рельеф  $\delta_{h_{\max}}$ , можно получить по формуле [1]:

$$h_{\max} = \frac{fM}{r} \delta_{h_{\max}}, \quad (1)$$

где  $f$  – фокусное расстояние фотокамеры;

$M$  – знаменатель масштаба создаваемого плана;

$r$  – максимальное расстояние от точки надира до любой точки трансформируемого снимка, которая попадет на фотоплан.

Соответственное расстояние на фотоплане  $r'$  можно рассчитать по формуле [1]:

$$r' = \frac{H}{fM} r. \quad (2)$$

<sup>1</sup> Основные положения по созданию топографических планов масштабов 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500 : ГКНП 02-004-2010. – Введ. 01.06.10. – Минск : Проектный ин-т Белгипрозем, 2010. – 24 с.

<sup>2</sup> Инструкция по фотограмметрическим работам при создании цифровых топографических карт и планов : ГКИНП (ГНТА)-02-036-02. – Введ. 01.08.02. – М. : ЦНИИГАиК, 2002. – 100 с.

<sup>3</sup> Инструкция по фотограмметрическим работам при создании цифровых топографических карт и планов : ГКИНП (ОНТД) 12-001-03. – Минск : УП «БелНИЦзем», 2003. – 78 с.

<sup>4</sup> Инструкция по фотограмметрическим работам при создании топографических карт и планов : ГКИНП-36. – М. : Недра, 1974. – 80 с.

Как видим на основании формулы (1), предельное превышение  $h_{\max}$  можно увеличить при использовании аэрофотоаппаратов (АФА) с большим фокусным расстоянием  $f$ . Поэтому существовали пленочные АФА с разными фокусными расстояниями (вплоть до 500 мм) [2], чего нет при использовании цифровых камер, устанавливаемых на беспилотных летательных аппаратах (БПЛА).

Фокусное расстояние цифровой камеры FC-220, установленной на БПЛА и используемой при съемке учебно-лабораторного корпуса № 3 Полоцкого государственного университета (ПГУ), составило 4,73 мм при размере кадра  $6,32 \times 4,74$  мм [3]. Из-за малого фокусного расстояния искажения за рельеф будут велики.

Если превышения точек больше допустимых, то трансформирование выполняли по зонам, допуская смещения в каждой зоне  $\delta h_{\max}$  не более 0,4 мм. Число зон трансформирования не должно было превышать трех [4]. Территория, занимаемая зоной трансформирования, значительна. Предположим, имели две зоны трансформирования (рисунок 1).

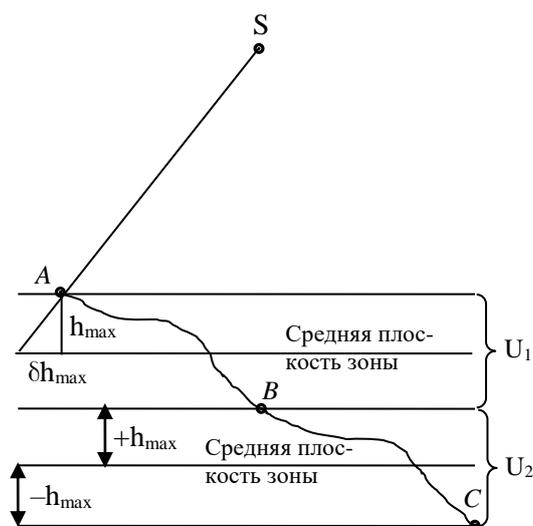


Рисунок 1. – Трансформирование снимков по зонам ( $U_1$  и  $U_2$  – зоны трансформирования)

Как видим, на рисунке 1 превышения над средней плоскостью зоны имеют разные знаки, следовательно, и искажения за рельеф, как свидетельствует формула (1), будут иметь разные знаки.

При монтаже фотопланов (ортофотопланов) допускается расхождение хорошо распознаваемых контуров 0,7 мм, согласно инструкции<sup>5</sup>, значит, ошибка будет равна 0,35 мм. Так как расхождение контуров на стыке зон или пикселей будет иметь разные знаки (см. рисунок 1), то для точки  $A$  в первой зоне искажение будет иметь знак плюс, а для точки  $B$  – знак минус. В следующей зоне искажение для точки  $B$  будет иметь знак плюс, то есть расхождение между контурами будет 0,7 мм, а ошибка не превысит 0,35 мм.

Таким образом, если контур в одной зоне смещен в одну сторону на 0,35 мм, то в другой зоне этот же контур смещен на 0,35 мм в другую сторону. Например, дорога будет точно посередине. То есть оставили запас для погрешности, которую можно допустить в следующей процедуре, называемой в цифровых технологиях «векторизация».

Что касается цифровых фотопланов, полученных с БПЛА и не только, то при их создании для учета искажений за рельеф используют цифровые модели рельефа (ЦМР). Здесь нет никаких зон трансформирования, нет смещений влево или вправо относительно изображаемого контура. В цифровых технологиях не будут компенсироваться ошибки, как это имело место при трансформировании по зонам. Качество ортофотоплана будет зависеть от качества ЦМР.

Тем не менее, в работе [5], посвященной цифровым методам, отмечается, что ошибка на граничной линии допускается 0,7 мм. Получается, что снимки «режут» по граничной линии так же, как и при аналоговых методах, а величина допуска 0,7 мм, возможно, взята потому, что в инструкциях<sup>6</sup> приведен такой допуск.

При создании модели высот фотограмметрическими методами, как отмечают авторы работы [5], слабым местом для ЦМР является необходимость знания хороших начальных приближений и большое число приближений. Для уменьшения числа приближений используют пирамиду исходных изображений или свертку исходных изображений, например, размером  $3 \times 3$  пиксела [5].

<sup>5</sup> См. сноску 4.

<sup>6</sup> См. сноски 2–4.

Для учета искажений за рельеф строят регулярную сеть высот GRID. В работе [6] говорится, что при создании регулярной сети высот очень важно учитывать плотность (шаг) сетки, что определяет ее пространственное разрешение. Чем меньше выбранный шаг, тем точнее ЦМР – выше пространственное разрешение модели, но тем больше количество узлов сетки, следовательно, больше времени требуется на расчет ЦМР и больше места для хранения.

В ходе обработки снимков корпуса № 3 ПГУ в программе Agisoft Photoscan сеть высот GRID строилась не для каждого пиксела, а с шагом 0,5–1 м на местности, что на снимке масштаба 1:11000 составит 0,09 мм. То есть имели довольно густую сеть GRID.

В некоторых программных продуктах имеется возможность предварительно оценить точность ортофотоплана по расхождениям соответствующих контуров на линиях «пореза». Например, в программе Photomod есть опция «выполнить оценку точности монтирования ортофотоплана» [7]. Выполнив эту процедуру, можно создать таблицу ошибок на линиях «порезов», по значениям которых пользователь может определить, подходят ли полученные расхождения для ортофотоплана требуемого масштаба.

В ходе обработки снимков в программе Agisoft Photoscan не отображаются численные значения расхождений контуров на граничной линии «пореза». Получается, что оценить точность ортофотоплана можно только в конце работы<sup>7</sup>.

Как в аналоговых, так и в цифровых технологиях используют центральные фрагменты снимков. При съемке с БПЛА продольные и поперечные перекрытия снимков значительно больше, чем в аналоговых технологиях, так что центральные части снимков имеют малые размеры.

**Заключение.** Цифровая модель рельефа или поверхности имеет высокую плотность и позволяет учесть искажения за рельеф значительно точнее, чем при трансформировании по зонам. Здесь нет понятия в одну или другую сторону сместился контур. Поэтому мы считаем, что требования инструкций<sup>8</sup>, относящиеся еще к требованиям аналоговых технологий<sup>9</sup>, не приемлемы для оценки точности современных ортофотопланов, так как не будут выдержаны требования к отображению, например, капитальных строений.

Мы считаем, что величины допустимых искажений за рельеф на граничной линии в современных технологиях создания ортофотопланов надо пересматривать. В случае цифровых технологий ошибки за рельеф на граничной линии не должны превышать 0,35 мм, что соответствует требованиям инструкции<sup>10</sup>.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Михеева, А.А. Прикладная фотограмметрия : учеб.-метод. комплекс / А.А. Михеева, В.В. Ялтыхов. – Новополоцк : ПГУ, 2006. – 320 с.
2. Аэрофотосъемочные работы: справочник аэрофотосъемщика / А.А. Попов [и др.]. – М. : Транспорт, 1984. – 200 с.
3. Анализ разрешающей способности снимков, полученных с беспилотного летательного аппарата / А.А. Михеева, В.В. Ялтыхов, П.Ф. Парадня // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Стр-во. Прикладные науки. – 2018. – № 8. – С. 184–192.
4. Лобанов, А.Н. Аэрофототопография / А.Н. Лобанов. – 2-е изд., доп. – М. : Недра, 1978. – 575 с.
5. Михайлов, А.П. Фотограмметрия : учеб. для вузов / А.П. Михайлов, А.Г. Чибуничев ; под общ. ред. А.Г. Чибуничева. – М. : МИИГАиК, 2016. – 294 с.
6. Хромых, В.В. Цифровые модели рельефа : учеб. пособие / В.В. Хромых, О.В. Хромых. – Томск : ТМЛ Пресс, 2007. – 178 с.
7. Краснопевцев, Б.В. Методические указания по фотограмметрической обработке снимков на цифровой фотограмметрической системе Photomod 4.4 Demo и Photomod 4.4 Lite / Б.В. Краснопевцев. – М. : МИИГАиК, 2012. – 44 с.

#### REFERENCES

1. Mikheeva, A.A. & Yaltykhov, V.V. (2006). *Prikladnaya fotogrammetriya*. Novopolotsk: PSU. (In Russ.).
2. Popov, A.A., Poletaev, Yu.I., Evdokimov, Yu.V., Baitin, V.I., Nitsoglo, S.A., Tankus, A.Yu., Gorin, G.S. & Baranova, S.G. (1984). *Aerofotos"emochnye raboty: spravochnik aerofotos"emshchika*. Moscow: Transport. (In Russ.).
3. Mikheeva, A.A., Yaltykhov, V.V. & Paradnya, P.F. (2018). Analiz razreshayushchei sposobnosti snimkov, poluchennykh s bespilotnogo letatel'nogo apparata [The analysis of the resolution ability of images received from an unmanned aerial vehicle]. *Vestn. Polots. gos. un-ta. Ser. F, Str-vo. Prikladnye nauki [Vestnik of Polotsk State University. Part F. Constructions. Applied Sciences]*, (8), 184–192. (In Russ., abstr. in Engl.).
4. Lobanov, A.N. (1978). *Aerofototopografiya*. Moscow: Nedra. (In Russ.).
5. Mikhailov, A.P. & Chibunichev, A.G. (2016). *Fotogrammetriya*. Moscow: MIIGAIK. (In Russ.).
6. Khromykh, V.V. & Khromykh, V.V. (2007). *Tsifrovye modeli rel'efa*. Tomsk: TML Press. (In Russ.).
7. Krasnopevtsev, B.V. (2012). *Metodicheskie ukazaniya po fotogrammetricheskoj obrabotke snimkov na tsifrovoi fotogrammetricheskoj sisteme Photomod 4.4 Demo i Photomod 4.4 Lite*. Moscow: MIIGAIK. (In Russ.).

Поступила 28.04.2022

<sup>7</sup> Agisoft Photoscan. Руководство пользователя. URL: [https://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro\\_1\\_2\\_ru.pdf](https://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_2_ru.pdf).

<sup>8</sup> См. сноски 1–3.

<sup>9</sup> См. сноску 4.

<sup>10</sup> См. сноску 1.

**ASSESSMENT OF THE ACCURACY OF PHOTOPLAN****A. MIKHEEVA, V. YALTYKHOV, P. PARADNYA**

*When using analog aerial cameras, photomaps were assembled from transformed images. If the elevation of the points of the terrain made it possible to obtain acceptable distortions for the relief, then they were transformed into one zone. Otherwise, the transformation was performed by zones, allowing displacements in each zone of no more than 0.4 mm. In neighboring zones, the displacements at the zone boundary had opposite directions, and the discrepancy between the contours could reach 0.8 mm. Its average value was taken as the final position of the contour, which compensated for position errors in neighboring zones.*

*When creating digital photomaps and orthophotomaps, digital elevation models (DEM) are used to account for terrain distortions. Digital transform technology does not use transform zones and therefore will not compensate for errors as it would with zone transforms. The quality of the orthomosaic will depend on the accuracy of the DEM. A digital model of a relief or surface has a high density and makes it possible to take into account distortions for the relief much more accurately than when transforming by zones.*

*The paper analyzes the requirements of the current regulatory documents when creating digital photomaps and orthophotomaps, provides relevant conclusions and recommendations.*

**Keywords:** *orthophotoplan, Agisoft Photoscan, digital elevation model, DTM accuracy, transform zone.*

## СОДЕРЖАНИЕ

### СТРОИТЕЛЬСТВО

<i>Войтов И.В., Еловик В.Л.</i> Современные методы расчета и анализа режимов работы центробежных насосов с регулируемым приводом в составе систем водоснабжения и водоотведения .....	2
<i>Войтов И.В., Еловик В.Л.</i> Расчет и анализ режимов работы и энергопотребления центробежных насосов с частотно-регулируемым электроприводом в системах водоснабжения .....	10
<i>Садовская Е.А., Леонович С.Н.</i> Расчет коэффициента интенсивности напряжения при нормальном отрыве по прочности на растяжение при изгибе .....	27
<i>Садовская Е.А., Леонович С.Н., Будревич Н.А.</i> Практическая апробация многопараметричной методики оценки качества фибробетона на строительной площадке .....	32
<i>Бакатович А.А., Бакатович Н.В., Пенкрат А.Н.</i> Фракционный состав измельченной сосновой коры и вид вяжущего компонента как основные факторы, влияющие на коэффициент теплопроводности теплоизоляционных плит .....	38
<i>Васильев А.А.</i> Оценка и прогнозирование максимальной величины карбонизации бетона .....	46
<i>Иванов Д.В., Москалькова Ю.Г., Гомелюк И.В.</i> Граф обработки при георадарных исследованиях антропогенных отложений на урбанизированных территориях .....	54
<i>Кравцов В.Н.</i> Универсальный метод оценки несущей способности основания вдавливаемой сваи на основе решения частной задачи механики грунтов о его устойчивости и использования физико-механических свойств грунтов .....	63
<i>Лазовский Д.Н., Глухов Д.О., Лазовский Е.Д.</i> Моделирование работы усиленных в растянутой зоне изгибаемых железобетонных элементов при длительной нагрузке .....	75
<i>Павлова И.П., Беломесова К.Ю.</i> Стойкость базальтового фиброволокна в щелочной среде гидратирующих цементных систем .....	81
<i>Малков И.Г., Толочко А.В.</i> Классификация объектов архитектурно-визуальной информации и условия их размещения .....	89
<i>Морозова Е.Б.</i> Пространственная организация промышленного предприятия – история развития типа .....	96
<i>Соловьёв А.А.</i> Натурные исследования второго этажа здания бывшего «Гранд Отеля» по проспекту Ф. Скорины, д. № 5 в г. Полоцке .....	102

### ГЕОЭКОЛОГИЯ

<i>Волчек А.А., Парфомук С.И., Шешко Н.Н., Шпендик Н.Н., Дашкевич Д.Н., Сидак С.В., Кухаревич М.Ф.</i> Оценка влияния рыбхоза «Локтыши» на сток реки Лань .....	112
---	-----

### ГЕОДЕЗИЯ

<i>Михеева А.А., Ялтыхов В.В., Парадня П.Ф.</i> Оценка точности фотопланов .....	124
--	-----