

MIESIĘCZNIK
POŁOCKI.

Tom I.
Rok 1818.

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

№ 1(40), 2025

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 ДЗЯРЖАЎНАГА ЎНІВЕРСІТЭТА
Серія F. Будаўніцтва. Прыкладныя навукі

У серыі F навукова-тэарэтычнага часопіса друкуюцца артыкулы, якія прайшлі рэцэнзаваўне 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 имени Евфросинии Полоцкой,
ул. Блохина, 29, г. Новополоцк, 211440, Беларусь
тел. + 375 (214) 59 95 41, e-mail: vestnik@psu.by

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

Подписано к печати 15.04.2025. Бумага офсетная 80 г/м². Формат 60×84^{1/8}. Ризография.
Усл. печ. л. 8,83. Уч.-изд. л. 10,65. Тираж 50 экз. Заказ 150.

СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 624.012.45

DOI 10.52928/2070-1683-2025-40-1-2-12

АППРОКСИМАЦИИ ДИАГРАММ ДЕФОРМИРОВАНИЯ БЕТОНА В НЕЛИНЕЙНОМ РАСЧЕТЕ ВНЕЦЕНТРЕННО СЖАТЫХ ТРУБОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

д-р техн. наук, проф. Д.Н. ЛАЗОВСКИЙ¹⁾, канд. техн. наук, доц. Д.О. ГЛУХОВ²⁾,
канд. техн. наук А.М. ХАТКЕВИЧ³⁾, канд. техн. наук, доц. А.И. КОЛТУНОВ⁴⁾

^(1), 3), 4) Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой, ²⁾ ООО «СофтКлуб», Минск)
¹⁾ d.lazovski@psu.by, ²⁾ d.gluhov@psu.by, ³⁾ a.khatkevich@psu.by, ⁴⁾ a.koltunov@psu.by

Рассмотрена возможность использования для расчета внецентренно сжатых трубобетонных элементов некоторых аппроксимаций диаграмм деформирования бетона. Сопоставлены результаты нелинейного расчета параметров напряженно-деформированного состояния с экспериментальными данными из сформированной выборки исследований. Аппроксимация диаграммы деформирования бетона с горизонтальным участком, следующим за пиковой точкой, позволяет получить параметры напряженно-деформированного состояния в большей степени соответствующие экспериментальным данным.

Ключевые слова: трубобетонный элемент, нелинейный расчет, диаграмма деформирования, аппроксимация диаграммы.

Введение. Мировая практика строительства подтверждает целесообразность использования трубобетонных элементов для сильно нагруженных конструкций зданий и сооружений. Трубобетонные элементы удачно сочетают в себе преимущества как стальных, так и железобетонных конструкций, обладая при оправданной стоимости изготовления высокой жесткостью и несущей способностью, а также высокой надежностью благодаря пластическому характеру разрушения. Этим объясняется большой интерес, проявляемый учеными-исследователями к трубобетонным элементам [1–35].

Разработка моделей и методов расчета, максимально соответствующих физическим процессам деформирования и разрушения трубобетонных элементов, не теряет своей актуальности и практической значимости для создания надежных строительных конструкций. В данном направлении известны работы [36–46].

Деформационные подходы к расчету строительных конструкций благодаря надежности получают в последнее время широкое распространение и допущены к применению нормами проектирования СП 266.1325800.2016¹⁾. Деформационная модель расчета базируется на совместном использовании диаграмм деформирования материалов, составляющих рассчитываемое поперечное сечение, а также обеспечении их совместной работы и условиях распределения деформаций в предположении соблюдения гипотезы плоских сечений. Описание нелинейного деформационного подхода к расчету трубобетонных элементов выполнялось в работах [45–48]. При этом вопрос аппроксимации в нелинейных расчетах диаграммы деформирования бетона, от которого в значительной степени зависит форма разрушения и несущая способность трубобетонных элементов, остается открытым.

В связи с этим цель данной работы – исследовать применимость различных аппроксимаций диаграмм деформирования бетона для выполнения нелинейных расчетов внецентренно сжатых трубобетонных элементов на результатах экспериментальных исследований различных авторов.

Результаты исследования и их анализ. Традиционно для бетона принимается нелинейная диаграмма состояния бетона « σ_c (σ_{ct}) – ε_c (ε_{ct})» с ниспадающей ветвью (ЕКБ-ФИП)²⁾ (рисунок 1, а):

$$\begin{cases} \frac{\sigma_c}{f_c} = \frac{k_c \eta_c - \eta_c^2}{1 + (k_c - 2) \eta_c}; & k_c = \frac{1,1 E_{cm} |\varepsilon_{c1}|}{f_c}; & \eta_c = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}; & \varepsilon_{c1} = f_c \left(0,12 + \frac{18,8}{f_c} \right) \cdot 10^{-4}; \\ \frac{\sigma_{ct}}{f_{ct}} = \frac{k_{ct} \eta_{ct} - \eta_{ct}^2}{1 + (k_{ct} - 2) \eta_{ct}}; & k_{ct} = \frac{E_{ct} \varepsilon_{ct1}}{f_{ct}}; & \eta_{ct} = \frac{\varepsilon_{ct}}{\varepsilon_{ct1}}; & \varepsilon_{ct1} = \frac{2 \cdot f_{ct}}{E_{ct}}, \end{cases} \quad (1)$$

¹⁾ СП 266.1325800.2016. Конструкции сталежелезобетонные: Правила проектирования: свод правил: издание официальное: утв. Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 30 декабря 2016 г. № 1030/пр: дата введения 01 июля 2017 г. URL: <http://www.consultant.ru>.

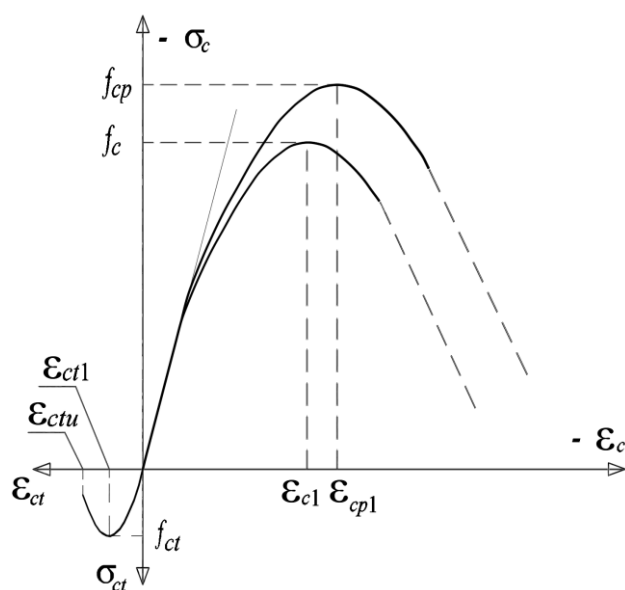
²⁾ СЕВ-FIB. Model Code for Concrete Structures. – Hoboken: Ernst & Sohn, 2013. – 402 p.

СП 5.03.01-2020. Бетонные и железобетонные конструкции / РУП «Стройтехнорм», М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь. – Минск, 2020. – 236 с.

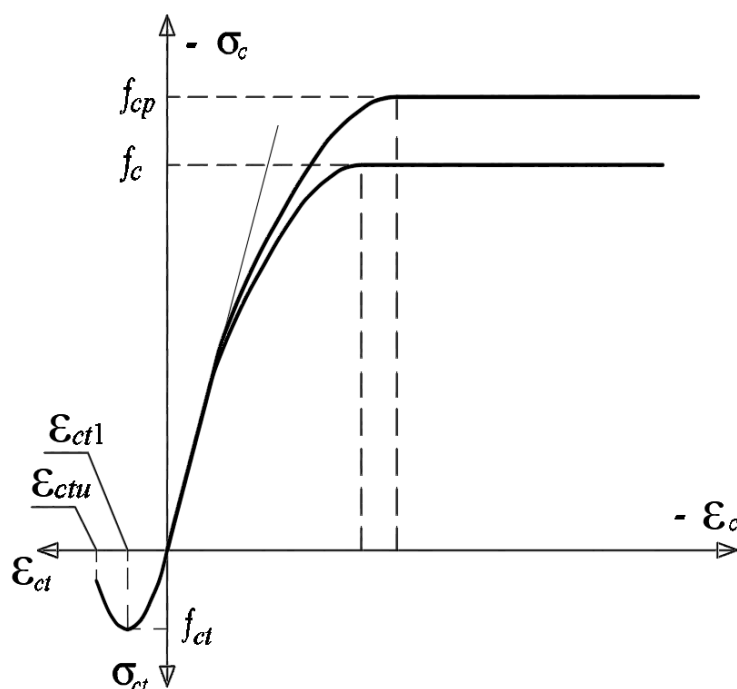
ТКП 45-5.03-16-2005 (02250). Конструкции сталежелезобетонные покрытий и перекрытий. Правила проектирования / М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь. – Минск, 2006. – 71 с.

где $\sigma_c (\sigma_{ct})$ – напряжения при сжатии (растяжении);
 $\varepsilon_c (\varepsilon_{ct})$ – относительные деформации при сжатии (растяжении);
 $\varepsilon_{cl} = 0,7 f_c^{0,31}$ – относительные деформации бетона в вершине диаграммы деформирования;
 $f_{ct} = 0,232 f_c^{2/3}$ – прочность бетона при растяжении;
 f_c – призмная прочность при сжатии;
 E_c – начальный модуль упругости;
 E_{ct} – начальный модуль упругости бетона при растяжении;
 ε_{ct1} – относительные деформации в вершине диаграммы деформирования;
 ε_{ctu} – предельное значение относительных деформаций бетона при растяжении.

Для получения более полного перераспределения усилий между бетоном и стальной трубой трубобетонного элемента целесообразно отказаться от введения ограничения продолжительности ниспадающей ветви по деформациям сжатия.



а



б

Рисунок 1. – Диаграммы деформирования бетона с ниспадающей ветвью (а) и с горизонтальной ветвью (б)

В формуле (1) значения E_{ct} , ε_{ct1} и ε_{ctu} определяются по СП 266.1325800.2016:

$$E_{ct} = \frac{10^7 \cdot f_{ct}}{750 + 81,55 \cdot f_{ct}}; \quad \varepsilon_{ctu} = \frac{K \cdot \varepsilon_{ct1}}{2}; \quad K = 6,4 + 0,1223 f_c. \quad (2)$$

Ввиду работы бетона в составе трубобетонных элементов в условиях многоосного сжатия сопротивление бетона может быть уточнено по СП 266.1325800.2016. В частности, при сжатии элемента продольным усилием с величиной эксцентриситета e_0 призмная прочность бетона:

$$f_{cp} = f_c + \Delta f_c \left(1 - \frac{7,5e_0}{D_p - 2t_p}\right), \quad (3)$$

$$\Delta f_c = f_c \left(2 + 2,52e_0^c \frac{-1}{(f_y A_p + f_c A_c)}\right) \frac{t_p}{D_p - 2t_p} \cdot \frac{f_y}{f_c}, \quad (4)$$

где A_p – площадь поперечного сечения бетона;

A_c – площадь поперечного сечения стальной трубы;

c – постоянная, принимаемая 25 МН при размерностях величин в формуле в МПа и м.

В то же время нелинейная диаграмма деформирования по аппроксимации (1) достаточно «быстро реализуется», поскольку на ниспадающей ветви происходит резкое снижение прочности при относительно небольших значениях деформаций. Для трубобетонных элементов такой характер деформирования не будет объективно отражать картину происходящих процессов, ведь в условиях ограниченного стальной оболочкой деформирования (расширения в поперечном направлении) бетон не может исчерпать своей прочности до нулевых значений.

Поэтому для нелинейных расчетов трубобетонных элементов вместо ниспадающей ветви предлагается использовать горизонтальный участок без ограничения предельных деформаций (рисунок 1, б). Данную модернизацию можно выполнить, базируясь на положениях надежной работы трубобетонных элементов с сохранением совместной работы трубы и бетона на всех стадиях, включая закритическую, в которой относительные деформации стали трубы превышают предел текучести.

Диаграмму деформирования стали трубы сопротивлением при сжатии и растяжении f_y , устанавливающей зависимость между напряжениями σ_s и относительными деформациями ε_s , предлагается принимать билинейной с горизонтальным участком и ограничением относительных деформаций удлинения при растяжении и без ограничения при сжатии (рисунок 2). Предельное значение относительной деформации стали трубы при растяжении принимается $\varepsilon_{su} = 0,025$, при сжатии не ограничивается.

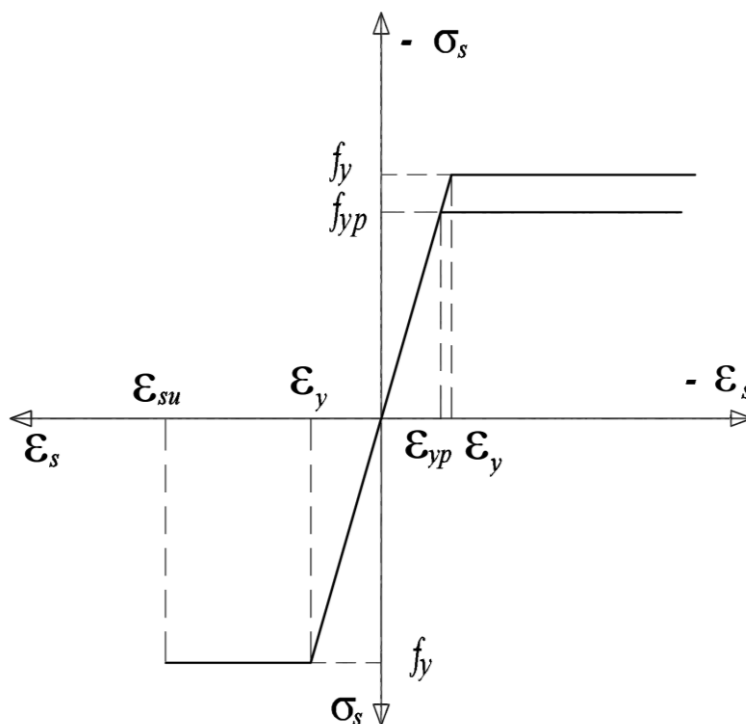


Рисунок 2. – Диаграмма деформирования стали трубы

Ввиду работы трубы в составе трубобетонных элементов сопротивление стали трубы может быть уточнено по СП 266.1325800.2016:

$$f_{yp} = f_y - \frac{1}{4} f_y \left(1 - \frac{7,5e_0}{D_p - 2t_p}\right); \quad (5)$$

$$1 - \frac{7,5e_0}{D_p - 2t_p} \geq 0. \quad (6)$$

Нелинейный деформационный расчет на основе предпосылок, описанных нами в работах [45–48], позволяет получать параметры напряженно-деформированного состояния внецентренно сжатого трубобетонного элемента на любой стадии нагружения. Для сопоставления теоретически рассчитанных параметров с экспериментальными данными была сформирована выборка исследований по данным испытаний различных авторов³.

Для наглядного примера результата расчета параметров напряженно-деформированного состояния рассмотрен внецентренно сжатый трубобетонный элемент со следующими характеристиками: диаметр трубы $D_p = 106$ мм, толщина стенки трубы $t_p = 3$ мм, эксцентриситет приложения продольного сжимающего усилия $e_0 = 100$ мм, сопротивление стали $f_y = 288$ МПа, сопротивление бетона $f_c = 16,8$ МПа. Экспериментально полученное значение предельного усилия $N_u^{exp} = 115$ кН. В результате расчета по нелинейной деформационной модели с использованием аппроксимации диаграммы деформирования бетона с ниспадающей ветвью (по рисунку 1, а) получено: усилие образования трещин $N_{cr} = 31,8$ кН, несущая способность $N_u^{th} = 98,9$ кН, максимальное значение относительных деформаций бетона сердечника и стали трубы при сжатии $\varepsilon_u = 339,7 \cdot 10^{-5}$, что превышает значения, соответствующие началу текучести стали трубы $\varepsilon_y = 144 \cdot 10^{-5}$ и вершины диаграммы деформирования бетона при сжатии $\varepsilon_{cl} = 168 \cdot 10^{-5}$.

При выполнении расчетов с использованием аппроксимации диаграммы деформирования бетона без ниспадающей ветви (по рисунку 1, б) получено: усилие образования трещин $N_{cr} = 38,1$ кН, несущая способность $N_u^{th} = 101$ кН, максимальное значение относительных деформаций бетона сердечника и стали трубы при сжатии $\varepsilon_u = 391 \cdot 10^{-5}$. Графическая интерпретация полученных результатов теоретического расчета приведена на рисунках 3–5.

Таким же образом были выполнены расчеты внецентренно сжатых трубобетонных элементов на результатах экспериментальных исследований из сформированной выборки. Сопоставление результатов нелинейного расчета приведено в таблице 1.

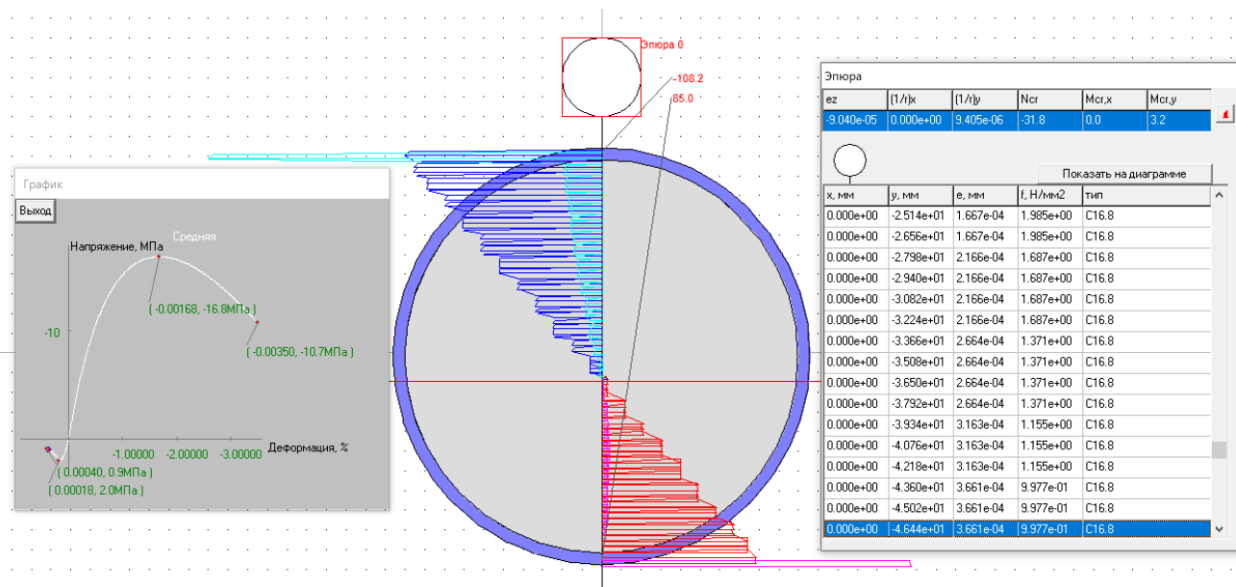


Рисунок 3. – Распределение относительных деформаций и нормальных напряжений по поперечному сечению внецентренно сжатого трубобетонного элемента на стадии образования трещин при N_{cr} (цифры справа от сечения – нормальные напряжения в МПа)

³ Сагдатов А.И. Напряженно-деформированное состояние сжатых трубобетонных элементов с внутренним стальным сердечником: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. – Магнитогорск, 2006. – 180 л.

Кузнецов К.С. Прочность трубобетонных колонн с предварительно обжатым ядром из высокопрочного бетона: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. – Магнитогорск, 2007 – 151 л.

Стороженко Л.И. Объемное напряженно-деформированное состояние железобетона с косвенным армированием: дис. ... д-ра. техн. наук: 05.23.01. – Кривой Рог, 1984. – 587 л.

Шабров В.Л. Прочность трубобетонных элементов диаметром 500 мм и более при внецентренном сжатии: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. – М.: НИИЖБ, 1988. – 253 л.

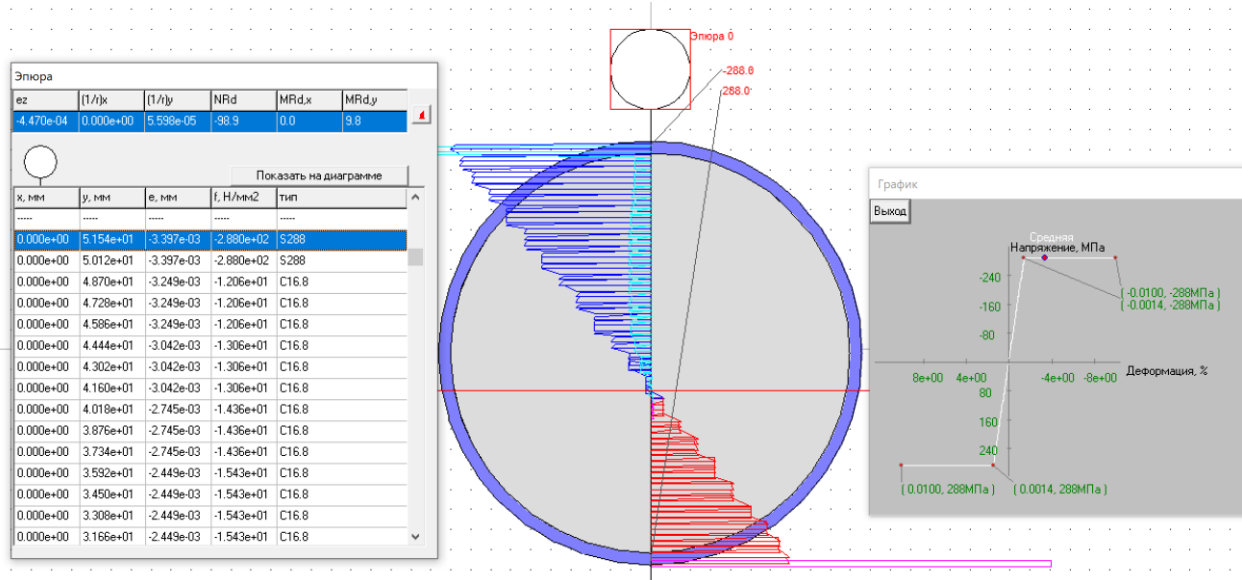
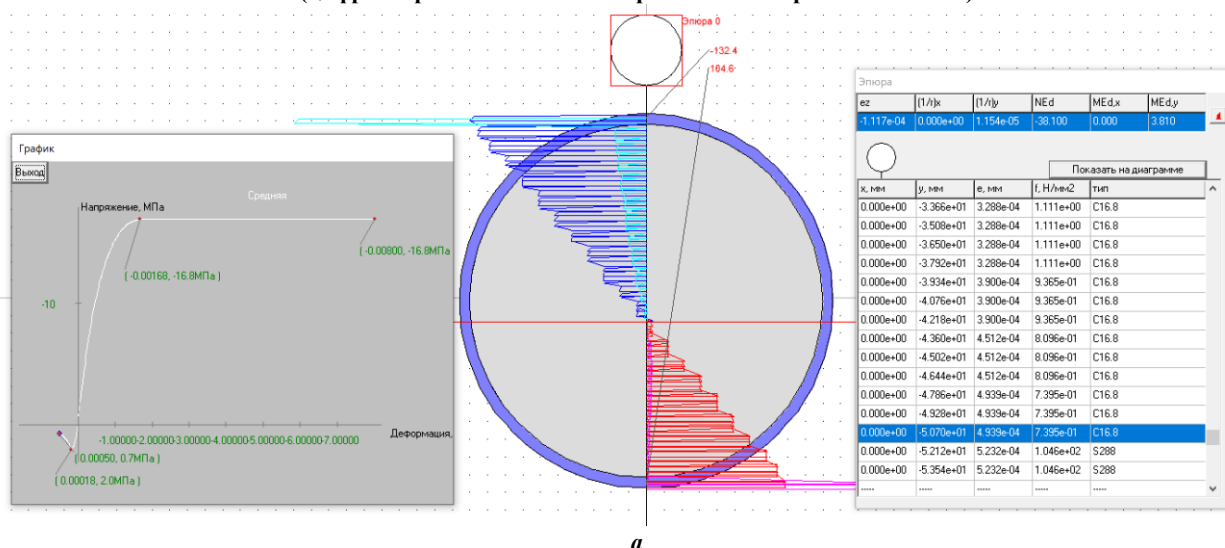
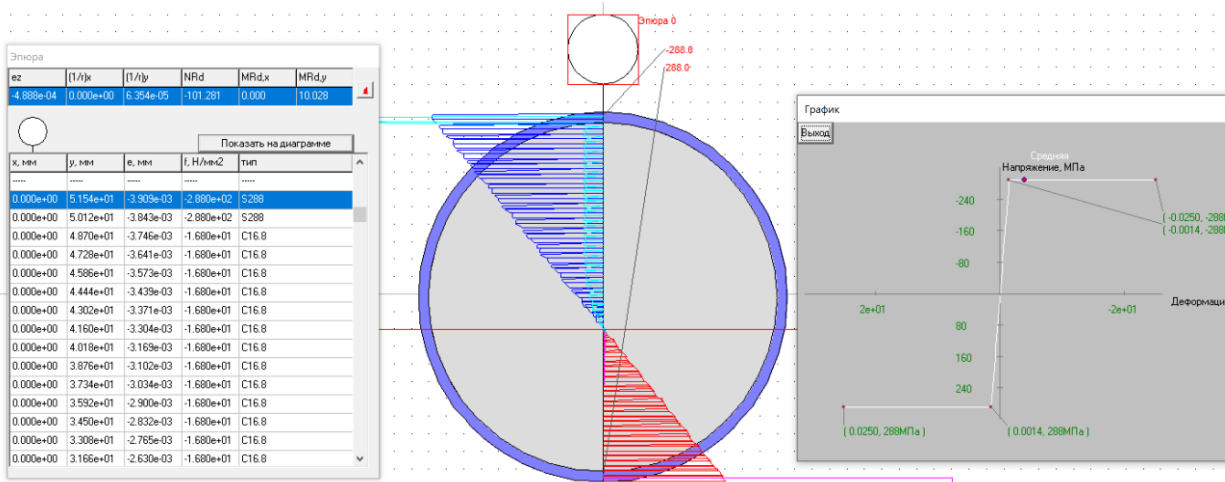


Рисунок 4. – Распределение относительных деформаций и нормальных напряжений по поперечному сечению внецентренно сжатого трубобетонного элемента в предельном по прочности состоянии при N_u (цифры справа от сечения – нормальные напряжения в МПа)



а



б

Рисунок 5. – Распределение относительных деформаций и нормальных напряжений по поперечному сечению внецентренно сжатого трубобетонного элемента на стадии образования трещин при N_{cr} (а) и в предельном по прочности состоянии при N_u (б) (цифры справа от сечения – нормальные напряжения в МПа)

Таблица 1. – Сопоставление результатов нелинейного расчета предельного усилия с экспериментальными данными из сформированной выборки

№ п/п	Автор	$\frac{e_0}{D_p}$	D_p , мм	t_p , мм	f_b , МПа	f_{sp} , МПа	f_c , МПа	f_{op} , МПа	Диаграмма бетона с ниспадающей ветвью				Диаграмма бетона с горизонтальным участком			
									$\varepsilon_u \cdot 10^{-5}$	N_u^{exp} , кН	N_u^{th} , кН	$\frac{N_u^{exp}}{N_u^{th}}$	$\varepsilon_u \cdot 10^{-5}$	N_u^{exp} , кН	N_u^{th} , кН	$\frac{N_u^{exp}}{N_u^{th}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	А.И. Сагатов	0,06	159	6	295	257	22	51,4	277,2	1406	1377,6	1,02	2217	1406	1447	0,97
2		0,13	159	6	295	295	22,5	22,5	346	1210	953,2	1,27	2405	1210	977	1,24
3		0,26	159	6	295	295	24,2	24,2	396,2	932	730,7	1,28	2150	932	791	1,18
4		0,06	159	6	295	257	32,1	59,2	256,7	1559	1473,1	1,06	2430	1559	1561	1,0
5		0,13	159	6	295	295	32,8	32,8	335	1412	1040,7	1,35	2194	1412	1126	1,25
6		0,26	159	6	295	295	35,1	35,1	331,9	1066	816,7	1,31	1680	1066	895	1,19
7		0,06	219	8	290	256	32,5	54,3	260,5	2921	2480,2	1,18	2440	2921	2624	1,11
8		0,13	219	8	290	290	30,5	30,5	319,5	2698	1709,1	1,58	1990	2698	1820	1,48
9		0,26	219	8	290	290	32,1	32,1	347,4	1962	1334,4	1,47	1790	1962	1459	1,34
10		0,06	219	8	290	253	46,1	71	249,4	3308	2867,9	1,15	2513	3308	3094	1,07
11	К.С. Кузнецов	0,13	219	8	290	290	43,4	43,4	295,2	3041	1974,2	1,54	2130	3041	2138	1,42
12		0,26	219	8	290	290	45,6	45,6	315,5	2289	1506,4	1,52	1823	2289	1692	1,35
13		0,125	159	6	440	440	38,9	38,9	334,7	1774	1403,8	1,26	2422	1774	1527	1,16
14		0,25	159	6	440	440	41,6	41,6	341,2	1346	1092,9	1,23	1938	1346	1252	1,08
15		0,375	159	6	440	440	38	38	418,8	1059	861,7	1,23	1750	1059	987	1,07
16		0,125	159	6	440	440	55,8	55,8	280,6	1842	1558	1,18	2354	1842	1750	1,05
17		0,25	159	6	440	440	57,5	57,5	294,1	1515	1173,3	1,29	1779	1515	1406	1,08
18		0,375	159	6	440	440	59	59	308,8	1238	927,2	1,33	1717	1238	1134	1,09
19		0,125	106	4	435	435	40,5	40,5	295,5	849	608,4	1,4	2333	849	758	1,12
20		0,25	106	4	435	435	41,2	41,2	365,9	633	477,4	1,33	2315	633	544	1,18
21	Л.И. Стороженко	0,375	106	4	435	435	37,4	37,4	395,2	468	372,1	1,26	1706	468	429	1,09
22		0,125	106	4	435	435	54,6	54,6	293,3	839	678,3	1,24	2410	839	752	1,11
23		0,25	106	4	435	435	58,2	58,2	297,1	691	515,7	1,34	1727	691	616	1,12
24		0,375	106	4	435	435	57,8	57,8	323,3	572	405,8	1,41	1547	572	491	1,16
25		0,09	106	3	288	267	16,8	27,8	322,5	400	382,2	1,05	2455	400	400	1,0
26		0,189	106	3	288	288	16,8	16,8	350	300	272,3	1,1	2314	300	290	1,03
27		0,283	106	3	288	288	16,8	16,8	423	270	230	1,17	1746	270	247	1,09
28		0,377	106	3	288	288	16,8	16,8	463,6	230	199,8	1,15	1403	230	212	1,02
29		0,472	106	3	288	288	16,8	16,8	439,7	200	174,7	1,14	754	200	182	1,1
30		0,943	106	3	288	288	16,8	16,8	339,7	115	98,9	1,16	391	115	101	1,14
31		0,376	133	4	288	288	16,8	16,8	479,4	480	386,9	1,24	1563	480	410	1,17
32		0,752	133	4	288	288	16,8	16,8	410	250	241,8	1,03	560	250	246	1,02

Окончание таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
33	В.Л. Шадров	0,062	530	7,8	349,2	303	34,5	44,4	256,8	12500	11002	1,14	2151	12500	11566	1,08
34		0,125	530	7,8	349,2	346	34,5	35,1	297	10700	8357,9	1,28	1860	10700	8704	1,22
35		0,062	530	11,95	322,6	281	34,5	48,1	259	14500	12651	1,15	976	14500	13228	1,1
36		0,125	530	11,95	322,6	321	34,5	35	300,6	12500	9677,7	1,29	2138	12500	11698	1,07
37		0,064	630	6,6	303	264	25,6	31,5	272,1	12000	11316	1,06	2450	12000	11788	1,02
38		0,127	630	6,6	303	301	25,6	25,9	300,9	10500	8991,6	1,17	2272	10500	10855	0,97
39		0,064	630	9,8	311	271	34,9	43,3	263,5	17000	14920	1,14	2235	17000	15700	1,08
40		0,127	630	9,8	311	310	34,9	35,2	305,5	15000	11673	1,29	2016	15000	12590	1,19
41		0,063	720	7,7	395,4	344	28,3	35,6	267,1	18500	16768	1,1	2333	18500	17544	1,05
42		0,125	720	7,7	395,4	391	28,3	28,9	296,4	16000	13007	1,23	2346	16000	16021	1,0
43		0,063	720	9,6	315,6	274	28,3	35,6	265,2	18500	16645	1,11	2330	18500	17396	1,06
44		0,125	720	9,6	315,6	313	28,3	28,8	311,3	16000	13018	1,23	2150	16000	14020	1,14
45		0,063	720	11,74	274	239	28,3	36	269,8	19000	16828	1,13	2328	19000	17617	1,08
46		0,125	720	11,74	274	271	28,3	28,7	301,1	16650	13133	1,27	1996	16650	14081	1,18

Заключение. Нелинейными расчетами внецентренно сжатых трубобетонных элементов показана возможность применения аппроксимаций деформирования бетона при сжатии как с ниспадающей ветвью, так и с горизонтальной ветвью.

Результаты проведенного исследования выявили, что аппроксимация диаграммы деформирования бетона с горизонтальным участком, следующим за пиковой точкой, позволяет получить параметры напряженно-деформированного состояния, в большей степени соответствующие экспериментальным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Прочность изгибаемых трубобетонных элементов усовершенствованной конструкции / А.Л. Кришан, В.И. Римшин, В.Д. Колесников и др. // Стр-во и реконструкция. – 2024. – № 6(116). – С. 37–47. DOI: 10.33979/2073-7416-2024-116-6-37-47.
2. Прочность центрально сжатых трубобетонных элементов усовершенствованной конструкции / А.Л. Кришан, В.И. Римшин, М.А. Астафьева // Стр-во и реконструкция. – 2018. – № 3(77). – С. 12–21.
3. Кришан А.Л., Римшин В.И., Астафьева М.А. Сжатые трубобетонные элементы. Теория и практика. – М.: АСВ, 2020. – 322 с.
4. Кришан А.Л., Римшин В.И., Астафьева М.А. Самозаклинивающиеся элементы в трубобетонных колоннах // Academia. Архитектура и строительство. – 2023. – № 3. – С. 140–148. DOI: 10.22337/2077-9038-2023-3-140-148.
5. Прочность коротких трубобетонных колонн квадратного сечения / Римшин В.И., Анпилов С.М., Кришан А.Л. и др. // Русский инженер. – 2023. – № 2(79). – С. 46–48.
6. Кришан А.Л., Римшин В.И., Астафьева М.А., Сагадатов А.И., Семенова М.Н., Ступак А.А. Прочность и деформативность сжатых трубобетонных элементов квадратного сечения // БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2022. – № 6(1054). – С. 16–18.
7. Кришан А.Л., Суровцов М.М. Экспериментальные исследования прочности гибких трубобетонных колонн // Вестн. Магнитогорского гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. – 2013. – № 1(41). – С. 90–92.
8. Numerical analysis of axially loaded circular high strength concrete-filled double steel tubular short columns / M. Ahmed, Q.Q. Liang, V.I. Patel et al. // Thin-Walled Structures. – 2019. – № 138. – P. 105–116. DOI: 10.1016/j.tws.2019.02.001.
9. Residual Axial Bearing Capacity of Concrete-Filled Circular Steel Tubular Columns (CFCSTCs) after Transverse Impact / G. Du, A. Andjelic, Z. Li et al. // Applied Sciences. – 2018. – № 8(5). URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/8/5/793/htm> (дата обращения 16.12.2024).
10. Ge H.B., Usami T. Strength analysis of concrete-filled thin-walled steel box columns // Journal of Constructional Steel Research. – 1994. – Vol. 30, № 3. – P. 259–281. DOI: 10.1016/0143-974X(94)90003-5.
11. Han L.-H., Lam D., Nethercot D. Design Guide for Concrete-filled Double Skin Steel Tubular Structures. – London: CRC Press, 2018. – 125 p. DOI: 10.1201/9780429440410.
12. Hassanein M.F., Elchalakani M., Patel V.I. Overall buckling behaviour of circular concrete-filled dual steel tubular columns with stainless steel external tubes // Thin-Walled Structures. – 2017. – № 115(10). – P. 336–348. DOI: 10.1016/j.tws.2017.01.035.
13. Kibriya T. Performance of Concrete Filled Steel Tubular Columns // American Journal of Civil Engineering and Architecture. – 2017. – Vol. 5, № 2. – P. 35–39.
14. O'Shea M.D., Bridge R.Q. Design of circular thin-walled concrete filled steel tubes // Journal of Structural Engineering. – 2000. – Vol. 126, № 11. – P. 1295–1303. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2000)126:11(1295).
15. Uy B., Tao Z., Han L.-H. Behaviour of short and slender concrete-filled stainless steel tubular columns // Journal of Constructional Steel Research. – 2011. – № 67(3). – P. 360–378. DOI: 10.1016/j.jcsr.2010.10.004.
16. Abed F.H., Abdelmageed Y.I., Ilgun A.K. Flexural response of concrete-filled seamless steel tubes // Journal of Constructional Steel Research. – 2018. – № 149. – P. 53–63. DOI: 10.1016/j.jcsr.2018.06.030.
17. Jiang A., Chen J., Jin W.L. Experimental investigation and design of thin-walled concrete-filled steel tubes subject to bending // Thin-Walled Structures. – 2013. – № 63. – P. 44–50. DOI: 10.1016/j.tws.2012.10.008.
18. Gho W.M., Liu D. Flexural behavior of high-strength rectangular concrete-filled steel hollow sections // Journal of Constructional Steel Research. – 2004. – № 60(11). – P. 1681–1696. DOI: 10.1016/j.jcsr.2004.03.007.
19. Flexural behavior of high strength concrete filled high strength square steel tube / G. Li, D. Liu, Z. Yang et al. // Journal of Constructional Steel Research. – 2017. – № 128. – P. 732–744. DOI: 10.1016/j.jcsr.2016.10.007.
20. Further Study on the Flexural Behavior of Concrete-filled Steel Tubes / L.-H. Han, H. Lu, G.-H. Yao et al. // Journal of Constructional Steel Research. – 2006. – № 62(6). – P. 554–565. DOI: 10.1016/j.jcsr.2005.09.002.
21. Al-Obaidi S., Salim T., Hemzah S.A. Flexural behavior of concrete filled steel tube composite with different concrete compressive strength // International Journal of Civil Engineering and Technology. – 2018. – № 9(7). – P. 824–832.
22. Xiong M.-X., Xiong D.-X., Liew J.Y.R. Flexural performance of concrete filled tubes with high tensile steel and ultra-high strength concrete // Journal of Constructional Steel Research. – 2017. – № 132. – P. 191–202. DOI: 10.1016/j.jcsr.2017.01.017.
23. Tomii M., Sakino K. Elasto-plastic behavior of concrete filled square steel tubular beam-columns // Transactions of the Architectural Institute of Japan. – 1979. – № 280. – P. 111–120.
24. Uy B. Strength of short concrete filled high strength steel box columns // Journal of Constructional Steel Research. – 2001. – № 57(2). – P. 113–134. DOI: 10.1016/S0143-974X(00)00014-6.
25. Flexural performance of rectangular CFST members / R. Wang, L.-H. Han, J.-G. Nie et al. // Thin-Walled Structures. – 2014. – № 79. – P. 154–165. DOI: 10.1016/j.tws.2014.02.015.
26. Арленинов П.Д., Крылов С.Б., Смирнов П.П. Расчетно-экспериментальные исследования изгибаемых трубобетонных конструкций // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2017. – № 4. – С. 34–38.
27. Хазов П.А., Помазов А.П. Экспериментальное исследование продольного и поперечного изгиба трубобетонных стержней // Жилищное строительство. – 2023. – № 12. – С. 66–71. DOI: 10.31659/0044-4472-2023-12-66-71.
28. Якупова Л.З., Астанков К.Ю., Овчинников И.Г. О возможности применения свода правил СП 266.1325800.2016 «Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования» для проектирования трубобетонных конструкций в малом мостостроении // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2023. – № 2. – С. 112–121.

29. Deng Y.-Q., Huang Y., Young B. Design of concrete-filled high-strength steel RHS and SHS tubes under bending // *Engineering Structures*. – 2024. – Vol. 320. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.118891.
30. Попов И.П. Повышение несущей способности балки // *Вестн. Инженерной школы Дальневосточного федерального ун-та*. – 2024. – № 3(60). – С. 96–101. DOI: 10.24866/2227-6858/2024-3/96-101.
31. Повышение нагрузочной способности трубобетонной балки / И.Г. Овчинников, Д.Н. Парышев, А.В. Ильяков и др. // *Транспорт. Транспортные сооружения. Экология*. – 2019. – № 4. – С. 58–66.
32. Исследование напряженно-деформированного состояния изгибаемых элементов строительных конструкций из трубобетона / О.Е. Сысоев, С.В. Макаренко, А.Ю. Добрышкин и др. // *Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета*. – 2015. – Т. 1, № 3. – С. 94–99.
33. Упругопластическое деформирование сталебетонных балок с локальным смятием при трехточечном изгибе / П.А. Хазов, О.И. Ведяйкина, А.П. Помазов и др. // *Проблемы прочности и пластичности*. – 2024. – Т. 86, № 1. – С. 71–82. DOI: 10.32326/1814-9146-2024-86-1-71-82.
34. Кикин А.И., Санжаровский Р.С., Трулль В.А. Конструкции из стальных труб, заполненных бетоном. – М.: Стройиздат, 1974. – 144 с.
35. О работе сталежелезобетонных конструкций при внецентренном сжатии / Д.В. Конин, А.С. Крылов, Д.Н. Гаврилов и др. // *Промышленное и гражданское строительство*. – 2023. – № 12. – С. 31–37. DOI: 10.33622/0869-7019.2023.12.31-37.
36. Хазов П.А., Ситникова А.К., Чибаква Е.А. Расчет трубобетонных конструкций: современное состояние вопроса и перспективы дальнейших исследований (обзор) // *Приволжский научный журнал*. – 2023. – № 4. – С. 57–76.
37. Хашхожев К.Н., Аваков А.А. Расчет центрально сжатых трубобетонных колонн кольцевого сечения с учетом физической нелинейности // *Строительство и архитектура*. – 2021. – Т. 9, № 3. – С. 14–18. DOI: 10.29039/2308-0191-2021-9-3-14-18.
38. Определение напряженно-деформированного состояния коротких внецентренно-сжатых трубобетонных колонн методом конечных элементов путём сведения трёхмерной задачи к двумерной / В.С. Чепурненко, Б.М. Языев, П.М. Урвачёв и др. // *Строительство и архитектура*. – 2020. – Т. 8, № 4. – С. 87–94. DOI: 10.29039/2308-0191-2020-8-4-87-94.
39. Кришан А.Л., Сагатов А.И., Мельничук А.С. Реализация нелинейной деформационной модели при расчете прочности трубобетонных колонн // *Предотвращение аварий зданий и сооружений*. – 2010. – № 10. – С. 635–643.
40. Кришан А.Л. Диаграммный расчет прочности трубобетонных колонн // *Междунар. науч.-практ. конф. «Инженерные системы – 2011»*: тез. докл., Москва, 05–08 апр. 2011 г. / Под общ. ред. С.Н. Кривошапко. – М.: Рос. ун-т дружбы народов, 2011. – С. 79.
41. Кришан А.Л., Трошкина Е.А., Кузьмин А.В. Предложения по расчету прочности трубобетонных колонн // *Вестн. Магнитогорского гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова*. – 2011. – № 1(33). – С. 66–69.
42. Ведерникова А.А., Опбул Э.К. Расчет несущей способности внецентренно сжатых трубобетонных элементов с учетом нелинейных диаграмм материалов // *Вестн. гражданских инженеров*. – 2021. – № 1(84). – С. 36–45. DOI: 10.23968/1999-5571-2021-18-1-36-45.
43. Ведерникова А.А. Совершенствование методики расчета трубобетонных элементов обратным численно-аналитическим методом и ее применение // *Инженерный вестн. Дона*. – 2023. – № 11. – С. 437–449.
44. Астанков К.Ю. Анализ современных подходов к проектированию и строительству арочных мостов с использованием трубобетона // *Интернет-журнал «Транспортные сооружения»*. – 2023. – Т. 10, № 4. – DOI: 10.15862/11SATS423.
45. Кришан А.Л., Наркевич М.Ю. Анализ существующих методик расчета внецентренно сжатых трубобетонных колонн городских сооружений и зданий // *Предотвращение аварий зданий и сооружений*. – 2012. – № 1. – С. 1–5.
46. Лазовский Д.Н., Гиль А.И., Глухов Д.О. Деформационный подход к расчету сопротивления сжатию сталежелезобетонных элементов // *Вестн. МГСУ*. – 2024. – Т. 19, № 9. – С. 1469–1483. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1469-1483.
47. Нелинейный расчет изгибаемых сталежелезобетонных элементов / Д.Н. Лазовский, Д.О. Глухов, А.М. Хаткевич и др. // *Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Стр.-во. Прикладные науки*. – 2024. – № 2(37). – С. 9–23. DOI: 10.52928/2070-1683-2024-37-2-9-23.
48. Лазовский Д.Н., Глухов Д.О., Колтунов А.И., Хаткевич А.М. Нелинейный расчет трубобетонных элементов с круглыми трубами при изгибе // *Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Стр.-во. Прикладные науки*. – 2024. – № 3(38). – С. 2–11. DOI: 10.52928/2070-1683-2024-38-3-2-11.
49. Лазовский Д.Н., Хаткевич А.М., Глухов Д.О. Нелинейная деформационная модель в расчете внецентренно сжатых трубобетонных элементов // *Стр.-во и реконструкция*. – 2024. – № 6(116). – С. 48–59. DOI: 10.33979/2073-7416-2024-116-6-48-59.

REFERENCES

1. Krishan, A.L., Rimshin, V.I., Kolesnikov, V.D., Astafeva, M.A. & Likhid'ko, M.A. (2024). Prochnost' izgibaemykh trubobetonnykh elementov usovershenstvovannoi konstruktsii [Strength of bending concrete filled steel elements of improved design]. *Str-vo i rekonstruktsiya [Building and Reconstruction]*, 6(116), 37–47. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.33979/2073-7416-2024-116-6-37-47.
2. Krishan, A.L., Rimshin, V.I. & Astafeva, M.A. (2018). Prochnost' tsentral'no szhatykh trubobetonnykh elementov usovershenstvovannoi konstruktsii [Strength of centrally compressed pipe elements of improved design]. *Str-vo i rekonstruktsiya [Building and Reconstruction]*, 3(77), 12–21. (In Russ., in Engl.).
3. Krishan, A.L., Rimshin, V.I. & Astafeva, M.A. (2020). *Szhatye trubobetonnye elementy. Teoriya i praktika*. Moscow: ASV. (In Russ.).
4. Krishan, A.L., Rimshin, V.I. & Astafeva, M.A. (2023). Samozaklinivayushchiesya elementy v trubobetonnykh kolonnakh [Self-Locking Elements in Pipe-Concrete Columns]. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo [Academia. Architecture and Construction]*, (3), 140–148. (In Russ., in Engl.). DOI: 10.22337/2077-9038-2023-3-140-148.
5. Rimshin, V.I., Anpilov, S.M., Krishan, A.L., Astafeva, M.A. & Stupak, A.A. (2023). Prochnost' korotkikh trubobetonnykh kolonn kvadratnogo secheniya [Strength of short concrete filled steel tube columns of square section]. *Russkii inzhener [Russian engineer]*, 2(79), 46–48. (In Russ., abstr. in Engl.).
6. Krishan, A.L., Rimshin, V.I., Astafeva, M.A., Sagatov, A.I., Semenova, M.N. & Stupak, A.A. (2022). Prochnost' i deformativnost' szhatykh trubobetonnykh elementov kvadratnogo secheniya. *BST: Byulleten' stroitel'noi tekhniki*, 6(1054), 16–18. (In Russ.).
7. Krishan, A.L. & Surovtsov, M.M. (2013). Eksperimental'nye issledovaniya prochnosti gibkikh trubobetonnykh kolonn [Experimental reserches of strength of flexible concrete-filled tube (CFT) columns]. *Vestn. Magnitogorskogo gos. tekhn. un-ta im. G.I. Nosova [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]*, 1(41), 90–92. (In Russ., abstr. in Engl.).

8. Ahmed, M., Liang, Q.Q., Patel, V.I. & Hadi, M.N.S. (2019). Numerical analysis of axially loaded circular high strength concrete-filled double steel tubular short columns. *Thin-Walled Structures*, (138), 105–116. DOI: 10.1016/j.tws.2019.02.001
9. Du, G., Andjelic, A., Li, Z., Lei, Z. & Bie, X. (2018). Residual Axial Bearing Capacity of Concrete-Filled Circular Steel Tubular Columns (CFCSTCs) after Transverse Impact. *Applied Sciences*, 8(5). URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/8/5/793/htm>.
10. Ge, H.B. & Usami, T. (1994). Strength analysis of concrete-filled thin-walled steel box columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 30(3), 259–281. DOI: 10.1016/0143-974X(94)90003-5.
11. Han, L.-H., Lam, D., & Nethercot, D. (2018). *Design Guide for Concrete-filled Double Skin Steel Tubular Structures*. London: CRC Press. DOI: 10.1201/9780429440410.
12. Hassanein, M.F., Elchalakani, M. & Patel, V.I. (2017). Overall buckling behaviour of circular concrete-filled dual steel tubular columns with stainless steel external tubes. *Thin-Walled Structures*, 115(10), 336–348. DOI: 10.1016/j.tws.2017.01.035.
13. Kibriya, T. (2017). Performance of Concrete Filled Steel Tubular Columns. *American Journal of Civil Engineering and Architecture*, 5(2), 35–39.
14. O'Shea, M.D. & Bridge, R.Q. (2000). Design of circular thin-walled concrete filled steel tubes. *Journal of Structural Engineering*, 126(11), 1295–1303. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2000)126:11(1295).
15. Uy, B., Tao, Z. & Han, L.-H. (2011). Behaviour of short and slender concrete-filled stainless steel tubular columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 67(3), 360–378. DOI: 10.1016/j.jcsr.2010.10.004.
16. Abed, F.H., Abdelmageed, Y.I. & Ilgun, A.K. (2018). Flexural response of concrete-filled seamless steel tubes. *Journal of Constructional Steel Research*, (149), 53–63. DOI: 10.1016/j.jcsr.2018.06.030.
17. Jiang, A., Chen, J. & Jin, W.L. (2013). Experimental investigation and design of thin-walled concrete-filled steel tubes subject to bending. *Thin-Walled Structures*, (63), 44–50. DOI: 10.1016/j.tws.2012.10.008.
18. Ghossein, W.M. & Liu, D. (2004). Flexural behavior of high-strength rectangular concrete-filled steel hollow sections. *Journal of Constructional Steel Research*, 60(11), 1681–1696. DOI: 10.1016/j.jcsr.2004.03.007.
19. Li, G., Liu, D., Yang, Z. & Zhang, C. (2017). Flexural behavior of high strength concrete filled high strength square steel tube. *Journal of Constructional Steel Research*, (128), 732–744. DOI: 10.1016/j.jcsr.2016.10.007.
20. Han, L.-H., Lu, H., Yao, G.-H. & Liao, F. (2006). Further Study on the Flexural Behavior of Concrete-filled Steel Tubes. *Journal of Constructional Steel Research*, 62(6), 554–565. DOI: 10.1016/j.jcsr.2005.09.002.
21. Al-Obaidi, S., Salim, T. & Hemzah, S.A. (2018). Flexural behavior of concrete filled steel tube composite with different concrete compressive strength. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 9(7), 824–832.
22. Xiong, M.-X., Xiong, D.-X. & Liew, J.Y.R. (2017). Flexural performance of concrete filled tubes with high tensile steel and ultra-high strength concrete. *Journal of Constructional Steel Research*, (132), 191–202. DOI: 10.1016/j.jcsr.2017.01.017.
23. Tomii, M. & Sakino, K. (1979). Elasto-plastic behavior of concrete filled square steel tubular beam-columns. *Transactions of the Architectural Institute of Japan*, (280), 111–120.
24. Uy, B. (2001). Strength of short concrete filled high strength steel box columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 57(2), 113–134. DOI: 10.1016/S0143-974X(00)00014-6.
25. Wang, R., Han, L.-H., Nie, J.-G. & Zhao, X.-L. (2014). Flexural performance of rectangular CFST members. *Thin-Walled Structures*, (79), 154–165. DOI: 10.1016/j.tws.2014.02.015.
26. Arleninov, P.D., Krylov, S.B. & Smirnov, P.P. (2017). Raschetno-eksperimental'nye issledovaniya izgibaemykh trubobetonnykh konstruktov [Calculation of the central and eccentrically compressed pipe-concrete structures strength]. *Seismostoikeye stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii* [Earthquake engineering. Constructions safety], (4), 34–38. (In Russ., abstr. in Engl.).
27. Khazov, P.A. & Pomazov, A.P. (2023). Eksperimental'noe issledovanie prodol'nogo i poperechnogo izgiba trubobetonnykh sterzhnei [Experimental Study of Longitudinal and Transverse Bending of Pipe Concrete Rods]. *Zhishchnoe stroitel'stvo* [Housing Construction], (12), 66–71. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.31659/0044-4472-2023-12-66-71.
28. Yakupova, L.Z., Astankov, K.Y., & Ovchinnikov, I.G. (2023). O vozmozhnosti primeneniya svoda pravil SP 266.1325800.2016 «Konstruktivnyye stalezhelzobetonnye. Pravila projektirovaniya trubobetonnykh konstruktov v malom mostostroenii» [The code of norms SP 266.1325800.2016 «Composite steel and concrete structures. Design rules» applicability for the low-span bridges made of concrete-filled steel tubes design]. *Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya* [Transport. Transport facilities. Ecology], (2), 112–121. (In Russ., abstr. in Engl.).
29. Deng, Y.-Q., Huang, Y. & Young, B. (2024). Design of concrete-filled high-strength steel RHS and SHS tubes under bending. *Engineering Structures*, 320. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.118891.
30. Popov, I.P. (2024). Povyshenie nesushchei sposobnosti balki [Increasing the load-bearing capacity of the beam]. *Vestn. Inzhenernoi shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo un-ta [FEFU: School of Engineering Bulletin]*, 3(60), 96–101. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.24866/2227-6858/2024-3/96-101.
31. Ovchinnikov, I.G., Paryshev, D.N., Il'tyakov, A.V., Moiseev, O.Y., Kharin, V.V., Popov, I.P. & Kharin, D.A. (2019). Povyshenie nagruzochnoi sposobnosti trubobetonnoi balki [Increasing the load capacity of a concrete beam]. *Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya* [Transport. Transport facilities. Ecology], (4), 58–66. (In Russ., abstr. in Engl.).
32. Sysoev, O.E., Makarenko, S.V., Dobryshkin, A.Y. & Kuznetsov, E.A. (2015). Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya izgibaemykh elementov stroitel'nykh konstruktov iz trubobetona. *Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 1(3), 94–99. (In Russ.).
33. Khazov, P.A., Vedyakina, O.I., Pomazov, A.P. & Kozhanov, D.A. (2024). Uprugoplasticheskoe deformirovanie stalebetonnykh balok s lokal'nym smyatim pri trekhtochechnom izgibe [Elastic-plastic deformation of steel-concrete beams with local crumpling during three-point bending]. *Problemy prochnosti i plastichnosti* [Problems of Strength and Plasticity], 86(1), 71–82. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.32326/1814-9146-2024-86-1-71-82.
34. Kikin, A.I., Sanzharovskii, R.S. & Trull, V.A. (1974). *Konstruktivnyye iz stal'nykh trub, zapolnennykh betonom*. Moscow: Stroiizdat. (In Russ.).
35. Konin, D.V., Krylov, A.S., Gavrillov, D.N., Zhdanova, A.A. & Voropaeva, M.I. (2023). O rabote stalezhelzobetonnykh konstruktov pri vneshennem szhatii. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, (12), 31–37. (In Russ.). DOI: 10.33622/0869-7019.2023.12.31-37.
36. Khazov, P.A., Sitnikova, A.K. & Chibakova, E.A. (2023). Raschet trubobetonnykh konstruktov: sovremennoe sostoyanie voprosa i perspektivy dal'neishikh issledovaniy (obzor) [Calculation of pipe-concrete structures: the current state of the issue and prospects for further research (review)]. *Privolzhskii nauchnyi zhurnal* [Privolzhsky Scientific Journal], (4), 57–76. (In Russ., abstr. in Engl.).

37. Khashkhozhev, K.N. & Avakov, A.A. (2021). Raschet tsentral'no szhatykh trubobetonnykh kolonn kol'tsevogo secheniya s uchetom fizicheskoi nelineinosti [Calculation of centrally compressed concrete filled steel tubular columns of annular section taking into account physical nonlinearity]. *Stroitel'stvo i arkhitektura [Construction and Architecture]*, 9(3), 14–18. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.29039/2308-0191-2021-9-3-14-18.
38. Chepurmenko, V.S., Yazyev, B.M., Urvachev, P.M. & Avakov, A.A. (2020). Opredelenie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya korotkikh vnetsentrenno-szhatykh trubobetonnykh kolonn metodom konechnykh elementov putem svedeniya trekhmernoi zadachi k dvumernoi [Determination of stress-strain state of short eccentrically loaded concrete-filled steel tubular (CFST) columns using finite element method with reducing the problem from three-dimensional to two-dimensional]. *Stroitel'stvo i arkhitektura [Construction and Architecture]*, 8(4), 87–94. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.29039/2308-0191-2020-8-4-87-94.
39. Krishan, A.L., Sagadatov, A.I. & Mel'nychuk, A.S. (2010). Realizatsiya nelineinoi deformatsionnoi modeli pri raschete prochnosti trubobetonnykh kolonn. *Predotvrashchenie avarii zdaniy i sooruzheniy*, (10), 635–643. (In Russ.).
40. Krishan, A.L. (2011). Diagrammnyi raschet prochnosti trubobetonnykh kolonn. In S.N. Krivoschapko (Eds.) *Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Inzhenernye sistemy – 2011»: tez. dokl.*, Moskva, 05–08 apr. 2011 g. (79). Moscow: Ros. un-t družby narodov. (In Russ.).
41. Krishan, A.L., Troshkina, E.A. & Kuz'min, A.V. (2011). Predlozheniya po raschetu prochnosti trubobetonnykh kolonn. *Vestn. Magnitogorskogo gos. tekhn. un-ta im. G.I. Nosova*, 1(33), 66–69. (In Russ.).
42. Vedernikova, A.A. & Opbul, E.K. (2021). Raschet nesushchei sposobnosti vnetsentrenno szhatykh trubobetonnykh elementov s uchetom nelineinykh diagramm materialov [Bearing capacity calculation of eccentrically compressed concrete filled steel tube columns taking into account non-linear diagrams of materials]. *Vestn. grazhdanskikh inzhenerov [Bulletin of Civil Engineers]*, 1(84), 36–45. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.23968/1999-5571-2021-18-1-36-45.
43. Vedernikova, A.A. (2023). Sovershenstvovanie metodiki rascheta trubobetonnykh elementov obratnym chislenno-analiticheskim metodom i ee primenenie. *Inzhenernyi vestn. Dona*, (11), 437–449. (In Russ.).
44. Astankov K.Y. (2023). Analiz sovremennykh podkhodov k proektirovaniyu i stroitel'stvu arochnykh mostov s ispol'zovaniem trubobetona [Analysis of modern approaches to the design and construction of arch bridges using tube-reinforced concrete]. *Internet-zhurnal «Transportnye sooruzheniya» [Russian Journal of Transport Engineering]*, 10(4). (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.15862/11SATS423.
45. Krishan, A. L. & Narkevich, M. Y. (2012). Analiz sushchestvuyushchikh metodik rascheta vnetsentrenno szhatykh trubobetonnykh kolonn gorodskikh sooruzheniy i zdaniy. *Predotvrashchenie avarii zdaniy i sooruzheniy*, (1), 1–5. (In Russ.).
46. Lazovskii, D.N., Gil', A.I. & Glukhov, D.O. (2024). Deformatsionnyi podkhod k raschetu soprotivleniya szhatiyu stalezhelezobetonnym elementam [Deformation approach to the calculation of compressive strength of steel-reinforced concrete elements]. *Vestn. MGSU [Vestnik MGSU]*, 19(9), 1469–1483. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1469-1483.
47. Lazovskii, D.N., Glukhov, D.O., Khatkevich, A.M., Gil', A.I. & Chaparanga, E. (2024). Nelineinyi raschet izgibaemykh stalezhelezobetonnym elementam [Nonlinear calculation of bent steel-reinforced concrete elements]. *Vestn. Polotsk. gos. un-ta. Ser. F, Str-vo. Prikladnye nauki [Herald of Polotsk State University. Series F, Civil engineering. Applied sciences]*, 2(37), 9–23. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.52928/2070-1683-2024-37-2-9-23.
48. Lazovskii, D.N., Glukhov, D.O., Koltunov, A.I. & Khatkevich, A.M. (2024). Nelineinyi raschet trubobetonnykh elementov s kruglymi trubami pri izgibe [Nonlinear calculation of tubular concrete elements during bending]. *Vestn. Polotsk. gos. un-ta. Ser. F, Str-vo. Prikladnye nauki [Herald of Polotsk State University. Series F, Civil engineering. Applied sciences]*, 3(38), 2–11. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.52928/2070-1683-2024-38-3-2-11.
49. Lazovskii, D.N., Khatkevich, A.M. & Glukhov, D.O. (2024). Nelineinaya deformatsionnaya model' v raschete vnetsentrenno szhatykh trubobetonnykh elementov [Nonlinear deformation model in the analysis of eccentrically compressed concrete-filled steel tube elements]. *Str-vo i rekonstruktsiya [Building and Reconstruction]*, 6(116), 48–59. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.33979/2073-7416-2024-116-6-48-59.

Поступила 26.12.2024

APPROXIMATIONS OF CONCRETE DEFORMATION DIAGRAMS IN THE NONLINEAR CALCULATION OF NON-CENTRALLY COMPRESSED TUBULAR CONCRETE ELEMENTS

D. LAZOUSKI¹⁾, D. GLUKHOV²⁾, A. KHATKEVICH³⁾, A. KALTUNOU⁴⁾,

(1), 3), 4) *Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*, 2) *LLC «SoftClub»*, Minsk)

The possibility of using some approximations of concrete deformation diagrams to calculate non-centrally compressed tubular concrete elements is considered. The results of nonlinear calculation of stress-strain state parameters are compared with experimental data from the formed sample of studies. Approximation of the concrete deformation diagram with a horizontal section following the peak point makes it possible to obtain stress-strain state parameters that are more consistent with experimental data.

Keywords: tube concrete element, nonlinear calculation, deformation diagram, diagram approximation.

УДК 725+72.03

DOI 10.52928/2070-1683-2025-40-1-13-22

**РАЗВИТИЕ КАТЕГОРИИ ХУДОЖЕСТВЕННОГО
В ПРОМЫШЛЕННОЙ АРХИТЕКТУРЕ БЕЛАРУСИ**

д-р архитектуры, проф. Е.Б. МОРОЗОВА
(Белорусский национальный технический университет, Минск)
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2545-4792>

В исторической ретроспективе рассматривается развитие архитектурно-художественных аспектов промышленного проектирования. Белорусская практика представлена во временном интервале XIX – начала XXI вв. с акцентом на следование общемировым тенденциям и региональным особенностям.

Ключевые слова: промышленная архитектура, утилитарные постройки, архитектурные стили, художественные приемы, функциональный подход, рефлексия исторических стилей.

Введение. Промышленная архитектура, пришедшая в мировое зодчество в начале XVIII в., изначально рассматривалась как среда второго плана, как исключительно утилитарные постройки, требования к которым, исходя из триады Витрувия, ограничивались «пользой и прочностью». Вопрос «красоты» не принимался в расчет, однако художественные приемы отдельных стилей все же проникали в фасадные решения производственных корпусов, хотя только как внешняя декорация объема.

В середине XIX в., когда объекты промышленного производства в силу ряда причин переместились в города [1, с. 167–170], занимая их прибрежные территории, площадки вдоль основных транспортных коммуникаций и просто центральные районы, осмысление того, насколько применимо к ним понятие «художественного», вошло в архитектурный дискурс. Причем развивался этот процесс полярно: от полного неприятия художественного в промышленных постройках и потому исключения их из архитектурного поля¹, до признания градообразующей, ключевой роли производственных объектов в формировании новых, промышленных поселений и потому обязанных использовать художественный язык.

История промышленной архитектуры – это путь от подражания стилям гражданской архитектуры, их приспособления, выбора лучшего, более подходящего, к прямому участию в разработке функционализма – Интернационального стиля XX в. [2]. Относительно недавно промышленная архитектура еще раз встала в авангард стилового развития, инициировав создание такого направления, как High-Tech.

Одной из закономерностей развития промышленной архитектуры является одинаковость этого процесса в мировом пространстве, в разных странах и регионах [2], следовательно, и становление художественной составляющей в белорусском промышленном зодчестве шло теми же общими путями. Однако присутствие регионального аспекта все же имело место.

Основная часть. Появление промышленной архитектуры на белорусских землях несколько запаздывало по сравнению в Европой, поскольку этот процесс был напрямую связан с формированием капиталистических отношений, а они в Беларуси начали складываться только в XIX в. Это явилось первой особенностью белорусской практики – приемы новой, промышленной архитектуры стали воплощаться в мануфактурном строительстве, функциональное назначение которого было, безусловно, таким же, как и промышленного, но вот принципы организации пространства были другими. Их отличало введение в объемно-планировочную структуру объектов помимо системы человека еще и систему машины, которая диктовала основные требования к пространству.

Поэтому в таких мануфактурно-промышленных строениях часто использовалась либо местная архитектурная традиция, либо мотивы художественного стиля гражданских зданий. Утилитарный же подход в художественном осмыслении производственных построек, который идентифицировал эту новую, промышленную область зодчества в европейском строительстве XVIII – начала XIX вв., практически не имел места на белорусских землях.

Характерным примером использования местной архитектурной традиции можно назвать меднолитейное предприятие графа А. Хрептовича в имении Вишнево Ошмянского уезда (1773–1800 гг.). Стены всех объемов были возведены из местного камня, карниз и перемычки в окнах – из кирпича, кладка отличалась высоким качеством, размеры соблюдались очень точно, погрешность швов не превышала 0,5 см. Крыша была скатная с традиционными приемами строительства – венчающий карниз на углах имел достаточно большой вынос и опирался на металлические пятиугольные пластины (рисунок 1).

Художественный стиль, причем, как и в мировой практике, стиль классицизм, продвигали производственные постройки двух групп: казенные предприятия (провиантские и соляные склады в Полоцке, Витебске, Могилеве,

¹ Английский теоретик искусства Дж. Рескин фабричные здания сравнивал с норами мышей и гнездами птиц, проводя таким образом различие между архитектурой и утилитарными постройками [3].

1770-е гг.) и промышленные мануфактуры в имениях крупных землевладельцев (комплекс мануфактур А. Тызенгауза в Городнице и Лососне, 1765–1779 гг.; винокуренный и пивоваренный заводы в имениях Сапег Ружаны и Деречин, 1786 г.; судостроительная верфь Г. Потемкина в Кричеве, 1785–1794 гг.) (рисунок 2).



Рисунок 1. – Меднолитейная рудня в д. Вишнево

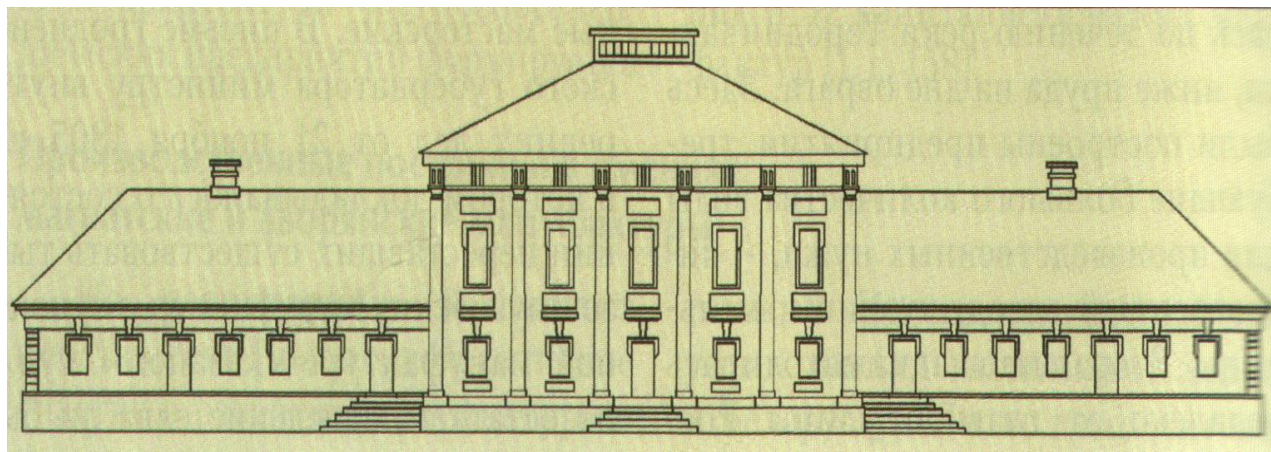


Рисунок 2. – Судостроительная верфь, Кричев

Такое положение объяснялось тем, что в отличие от европейских заказчиков промышленного строительства – представителей формирующегося класса буржуазии, как правило, выходцев из средних и низших слоев общества, на белорусских землях заказчики – государственные чиновники и дворяне-аристократы, принадлежали к образованным слоям общества. Стилевое украшение любого здания, в том числе и производственного, входило в границы их миропонимания. Отсюда и приглашение ими дипломированных архитекторов к промышленному строительству. Так, в разработке комплексов мануфактур в Городнице и Лососне принимали участие немецкий и итальянский архитекторы И. Мозер и Дж. Сакко; винокуренный завод в Деречине проектировал немецкий архитектор Я. Беккер; для производственных объектов русских вельмож в Кричеве, Пропойске и Гомеле использовались проекты архитекторов Москвы и Петербурга [4].

Начиная со второй половины XIX в. промышленные постройки стали быстро «догонять» европейскую практику, в том числе и с художественной точки зрения. В этом отразилась одна из закономерностей развития промышленной архитектуры – встраиваемость в общий процесс отдельных стран-субъектов [2]. В решении художественных вопросов в то время существовало два подхода: использование разных исторических стилей для декорации фасадов и поиск своего стиля, отражающего своеобразие промышленной архитектуры.

В соответствии с первым подходом распространялись классические мотивы и элементы псевдорусского стиля. Стилистику классицизма демонстрировали постройки военного ведомства – склады и мастерские, пороховые погреба Бобруйской и Брест-Литовской крепостей, провиантские склады губернских и уездных городов. Использование элементов неорусского стиля в определенной степени преследовало цель русификации белорусских земель, поэтому такая стилистика активно внедрялась в архитектуру значимых объектов городского коммунального хозяйства и железной дороги – электростанция в Витебске, 1897–1898 гг.; пожарное депо в Минске, 1885 г.; водонапорные башни в Гродно, Минске, 1890-е гг. (рисунок 3); ремонтные мастерские и депо в Минске 1871 г. [5].



Рисунок 3. – Водонапорные башни, проект

Объекты возводились на казенные средства соответствующими государственными департаментами, либо на средства объединенного капитала товариществ и акционерных обществ, поэтому к проектированию привлекались профессиональные специалисты, что и обеспечивало внимание к художественным вопросам. Этими специалистами были преимущественно выпускники высших политехнических школ, формировавшие профессию инженера-архитектора или гражданского инженера².

Поиск своего стиля как второй подход в решении художественных вопросов промышленного строительства заключался либо в выборе некоего стиля из имевшихся исторических, либо в создании своего, нового набора художественных приемов, способных отразить своеобразие производственных построек. Сразу следует сказать, что последнее – поиск новых средств художественного выражения с точки зрения «функциональной красоты», в отличие от мировой практики, на белорусских землях не имело места. А вот использование исторического стиля, признаваемого предпочтительным для объектов производства, было.

Таким стилем в мировой практике стала неоготика. Выбор готических мотивов для промышленного зодчества обосновывался в трудах французского архитектора Виолле-ле-Дюка, рекомендовавшего готику из-за ее способности демонстрировать работу конструкции [7]. И потому готическая стилистика могла отразить присущие промышленным постройкам рационализм и тесную взаимосвязь пространственного устройства с новой каркасной конструкцией.

В Беларуси использование в той или иной мере неоготики и сложившегося на ее основе в России кирпичного стиля можно встретить в большинстве предприятий частного капитала – винокуренные заводы в Остроглядах Речицкого уезда, в Жабчицах Пинского уезда, Савейках Слуцкого уезда, пивоваренные заводы в Гродно и Минске, Кошарский завод в Минске и др. (рисунок 4).

Эта стилистика была характерна для сахарных заводов А.И. Скимута, основавшего и развернувшего эту отрасль на белорусских землях. Масштабной архитектурой с неоготическим декором отличалась Добрушская бумажная фабрика, в 1870-х гг. она была второй в отрасли среди предприятий всей Российской империи и полностью соответствовала мировому уровню развития промышленной архитектуры (рисунок 5).



Рисунок 4. – Металлообрабатывающий завод «Гигант», Минск

² В Российской империи Институт гражданских инженеров (ИГИ) был открыт в Петербурге в 1832 г. (первое название – училище гражданских инженеров) [6].

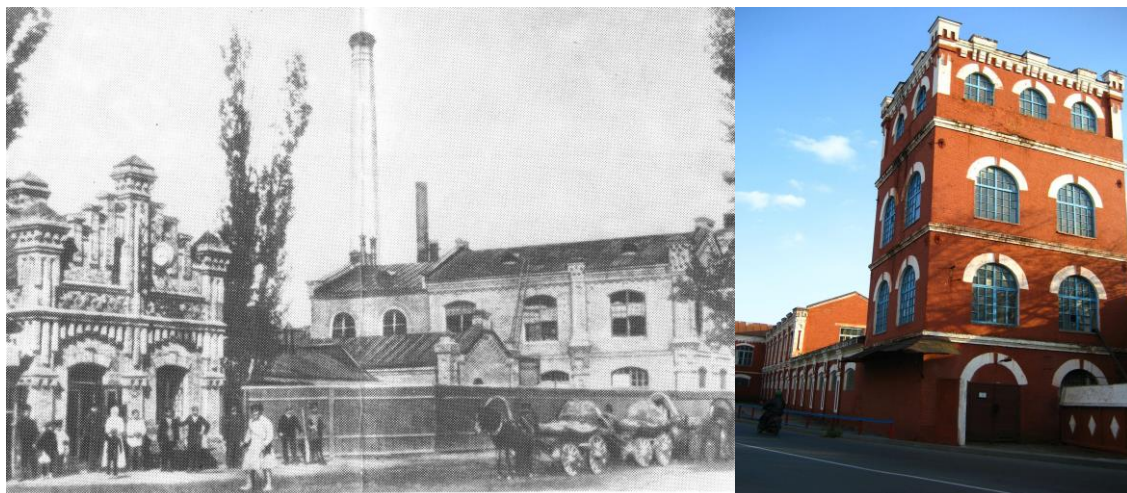


Рисунок 5. – Картонно-бумажная фабрика, Добруш

Строительство фабричных зданий велось по проектам местных архитекторов либо по чертежам специалистов фирм, поставляющих технологическое оборудование из Москвы, Варшавы, Вильно, Ревеля, Риги [4].

Начало XX в. принесло новые веяния в архитектурное формообразование, в мире складывалось художественное мировоззрение, основывающееся на функциональном подходе к организации пространства. Промышленная архитектура принимала в этом процессе деятельное участие, поскольку для создающегося «интернационального стиля монументом стала фабрика» [8].

В истории белорусского промышленного строительства период создания нового стиля был непростым. Сложная политическая и экономическая ситуация, отсутствие собственных профессиональных кадров и возможности широкомасштабного развертывания тяжелых отраслей промышленности обусловили строительство простых производственных зданий, использование недолговечных строительных материалов и упрощенных конструктивных решений. Но с другой стороны, эта скромная эстетика промышленного строительства развивалась в русле формирующегося на советской территории стиля конструктивизм. Его проникновение в белорусскую практику шло через центральные архитектурные школы Советской России (Москва, Петроград-Ленинград).

В соответствии с идеологическими установками того времени промышленные объекты рассматривались главными маркерами городской среды, местами приложения труда правящего класса – пролетариата, и потому их старались сделать доминантными, вывести на основные магистрали. Например, значимость Дома печати (1935 г.), размещенного на главной улице Минска – улице Советской, была акцентирована башней (рисунок 6).



Рисунок 6. – «Дом печати», Минск

Она фиксировала соединение производственного и редакционного корпусов, возвышалась над ними, но практически не имела серьезного функционального назначения – внутри находились несколько служебных помещений и одна из лестниц. Тем не менее, композиционная роль башни была высока – она демонстрировала эстетику конструктивизма и делала промышленный объект доминирующим в окружающей среде.

В стилистике конструктивизма были выполнены фабрика-кухня (арх. И. Груберт, 1937 г.), геодезическая обсерватория (арх. И. Володько, 1933–1935 гг.), фабрика «Коммунарка» в Минске (1931 г.) (рисунок 7), фабрики «КИМ» (рисунок 8) и «Знамя Индустриализации» в Витебске (арх. Г. Якушко, 1931 г.), стеклозавод в Гомеле (1933 г.), фабрика искусственного шелка в Могилеве (1929–1933 гг.).



Рисунок 7. – Фабрика «Коммунарка», Минск



Рисунок 8. – Чулочно-трикотажная фабрика им. 10-летия КИМ, Витебск

Наибольшую архитектурную выразительность имела фабрика-кухня. Композиция ее корпуса с двумя остекленными цилиндрическими объемами отличалась укрупненным масштабом, это позволило акцентировать общественную значимость фабрики-кухни, как элемента нового быта рабочих и служащих.

К сожалению большинство производственных построек тех непростых лет с художественной точки зрения были рядовыми и не могли демонстрировать выдающихся качеств конструктивистского авангарда, однако они несли идею высокого предназначения труда в социалистическом обществе, а также убежденность их создателей – архитекторов и инженеров, в возможности построения нового общества, переустройства жизни в том числе и архитектурой.

В истории развития художественных вопросов промышленного строительства всегда имела место рефлексия исторических стилей. Их выбор определялся разными причинами: вкусом и желанием заказчика, приемлемостью декоративных приемов, их способностью отразить своеобразие промышленного зодчества и т.д. Если не считать неоготики и кирпичного стиля, применение которых в конце XIX – начале XX вв. было принято в мировой практике декларативно, наиболее часто промышленная архитектура обращалась к классическим реминисценциям. Это объяснялось рационализмом классической традиции, хотя свойственная ей симметричность мало подходила к производственным постройкам.

К концу 1930-х гг. в промышленной архитектуре Беларуси в очередной раз проявилась классическая стилистика. Она распространялась до конца 1950-х гг. и была обусловлена следующим. В довоенное время это отражало смену художественной направленности в советской архитектуре, при этом возврат к классике в промышленных постройках проявлялся более сдержанно (корпус радиозавода в Минске, 1939–1940 гг., арх. А. Мозгалеvский). В послевоенное десятилетие классическую стилистику поддерживал пафос страны-победительницы в войне, а также осознание значимости промышленного производства в восстановлении народно-хозяйственного комплекса республики и, соответственно, объектов промышленной архитектуры в структуре социалистического города.

Наиболее показательным примером являлся комплекс предприятий на площади Я. Коласа в Минске (арх. И. Бовт, Н. Шпигельман, С. Ботковский, Л. Китаева, О. Островская, 1952–1958 гг.) (рисунок 9).



Рисунок 9. – Комплекс предприятий на пл. Я. Коласа, Минск

Само размещение крупной типографии и завода вычислительной техники на одной из главных площадей столицы свидетельствовало о важной роли, отводимой промышленным постройкам в городе. Располагаясь на угловых площадках, завод и типография выходили на площадь четырехэтажными корпусами основного производства. Угловое положение было зафиксировано башнями-надстройками, композиционно-пластическое решение их фасадов, а также фасадов главных корпусов было одинаковым, не взирая на разные технологические процессы предприятий. Пилястры, арочные окна, колонны, рустованная облицовка первого этажа, профилированные карнизы и лепной декор создали классическую архитектуру высокого качества, которая сыграла главную роль в пространственном формировании всей площади. Примечательно, что классический декор был сосредоточен только на парадных фасадах, выходящих на площадь, тогда как дворовые фасады, а также продолжающие линию застройки другие заводские здания демонстрировали утилитарный подход.

Вторая половина XX в. – это время распространения в мировой промышленной архитектуре рационализма и индустриальной утилитарности. Белорусская практика развивалась в том же русле, однако отличие все же было. Идеология социалистического общества предполагала в некотором роде пафосное отношение к промышленной архитектуре, не встречавшееся в это время нигде более, кроме как на территории СССР. Производственные объекты продолжали выделять в застройке города, размещать на важных магистралях, использовать специальные приемы усиления значимости, декоративного украшения фасадов. В целом это можно считать положительным явлением, поскольку стремление сделать среду для рабочих масс красивой должно было способствовать росту общей и бытовой культуры этого слоя населения. В мире такие задачи нигде не ставились, а внимание к архитектуре заводских построек объяснялось «страхом и филантропией» отдельных предпринимателей [9, с. 421].

Примером промышленного здания, демонстрировавшего сочетание рационализма и индустриальности с некоторыми формализованными классическими приемами может служить сборочный корпус часового завода в Минске (арх. И. Бовт, С. Ботковский, Н. Шпигельман, 1953 г.) (рисунок 10).



Рисунок 10. – Часовой завод «Луч», Минск

Его отличают выверенные пропорции, классическое выделение цокольного этажа, применение пилястр, стилизованного руста. В то же время здание имеет сплошное остекление фасадной части, за которой скрываются цеха сборки и современная каркасная конструкция всего объема.

Еще одним необычным для мировой практики явлением следует назвать создание предзаводских площадей и их ансамблевую застройку. Входная часть предприятия всегда играла важную роль в создании его архитектурного облика, однако в зарубежной практике крайне редко устраивались при ней площади. Объяснялось это двумя причинами: первая – стоимость земли, а вторая – нежелание создавать для рабочих пространства, где они могли бы собираться вместе. Поэтому столовые, спортзалы и прочие помещения для рабочих размещались внутри заводских территорий, с возможностью осуществлять контроль администрации за их деятельностью [2]. В советской практике, наоборот, такие объекты старались подтянуть к внешним границам предприятия с расчетом их большей открытости, возможности использования в том числе и горожанами. Именно предзаводские площади стали местом праздничных собраний рабочих и их семей, местом размещения заводских клубов, спортивных, торговых и др. учреждений общественного обслуживания. В белорусской промышленной архитектуре практически каждое предприятие имело предзаводскую площадь, а по размерам и составу объектов некоторые из них могли превосходить главные городские площади, как, например, предзаводская площадь Минского тракторного завода, 1946–1960-е гг. [10] (рисунок 11).



Рисунок 11. – Проходная на предзаводской площади тракторного завода, Минск

До 1990-х гг. в Беларуси строились предприятия, где мировые тенденции индустриальной утилитарности и рационализма в промышленной архитектуре сочетались с установками социалистической идеологии: корпуса заводов холодильников (рисунок 12), моторного, тракторного, научно-производственного объединения «Центр» в Минске; коврового комбината, заводов Минлегпищемаша в Бресте, завода БелАЗ в Жодино и др. Промышленное проектирование велось дипломированными архитекторами, что и обеспечивало разработку художественных вопросов (арх. И. Бовт, М. Буйлова, Э. Ботян, А. Гончаров, М. Гродников, Е. Ковалевский, С. Козырева, С. Митько, С. Шиманский, А. Шафранович и др.).



Рисунок 12. – Завод холодильников, Минск

Начавшийся в конце XX в. новый этап в историческом развитии Беларуси был сопряжен с множеством трудностей в промышленном строительстве, работа специалистов ориентировалась на структурно-пространственную реорганизацию существующих предприятий, приспособление их к новым экономическим условиям. Это заняло практически 15 лет. Сегодня промышленные объекты республики строятся в соответствии с мировыми стандартами, и художественная составляющая их архитектуры обуславливается схожими мотивациями, главная из которых – участие промышленной архитектуры в конкурентной борьбе современного глобального рынка (рисунки 13–16).



Рисунок 13. – Завод по производству легковых автомобилей «Geely» – «БелДжи», Борисов

Архитектура предприятий рассматривается как одна из разновидностей товара, эти объекты «должны приносить прибыль (экономический аспект), учитывать психоэмоциональные особенности потребителя, быть понятными ему (социальный аспект) и демонстрировать гибкость эстетического сознания, плюрализм в стилях и художественных формах (эстетический аспект)» [11, с. 4]. Социалистическая идеология ушла в прошлое, однако собственный исторический опыт республики и социально-ориентированная политика государства по-прежнему обеспечивают внимание белорусской практики к художественным вопросам архитектуры производства.



Рисунок 14. – Мусороперерабатывающий завод, Брест



Рисунок 15. – Завод по производству цементно-стружечных плит, Кричев



Рисунок 16. – Трубопрокатное производство, Жлобин

Заключение. Развитие категории «художественного» в архитектуре производственных объектов Беларуси проходило в соответствии с общими процессами в мировой практике промышленного строительства, однако имело определенные региональные особенности.

XIX в. характеризовался копированием декоративных приемов гражданской архитектуры и использованием местной архитектурной традиции в мануфактурно-промышленных постройках, более широким в отличие от европейской практики привлечением дипломированных архитекторов. Начиная со второй половины XIX в. в решении художественных вопросов стали использоваться два подхода: подбор разных исторических стилей для декорации фасадов и поиск собственных художественных приемов, отражающих своеобразие архитектуры производства. Первая половина XX в. была отмечена развитием художественных аспектов промышленного строительства в русле формирующегося стиля конструктивизм. Влияние идеологии социалистического общества обусловило новое отношение к производственным объектам в структуре города, особое внимание к их архитектуре и появление нового объекта – предзаводской площади. На протяжении всей истории промышленной архитектуры Беларуси ей была свойственна рефлексия классической традиции, обуславливаемая разными причинами.

Сегодня промышленная архитектура республики развивается в соответствии с общемировыми закономерностями и тенденциями, что распространяется также и на средства художественной выразительности. Тем не менее наряду с использованием общих мотиваций, подходов и композиционно-художественных средств сохраняется особое внимание белорусской практики к социальным вопросам архитектуры производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Морозова Е.Б. От промышленного поселения до технопарка: территориальные объекты промышленной архитектуры. – Минск: БНТУ, 2014. – 208 с.
2. Морозова Е.Б. Промышленное здание в истории архитектуры. – Минск: БНТУ, 2017. – 302 с.
3. Krufft H.-V. A history of architectural theory: from Vitruvius to the present. – London: Zwemmer; New York: Princeton Architectural Press, 1994. – 706 p.
4. Залесская Г.Л. «Фабричные строители» Беларуси конца XVIII–XIX веков // Вестн. Белорус. акад. архитектуры. – 2004. – № 1. – С. 56–57.
5. Залесская Г.Л. Огонь – мать и мачеха промышленной архитектуры // Архитектура и стр.-во. – 2006. – № 6. – С. 42–45.
6. Николаев И.С. Архитектурное образование // Большая Советская Энциклопедия: в 30 т. – 3-е изд. – М.: Советская энциклопедия, 1970–1978. – Т. 2. – С. 896–899.
7. Lemoine B. Architecture in France, 1800–1900. – NY: Harry N. Abrams, 1998. – 200 p.
8. Kostof S. A history of architecture. Settings and rituals. – NY, Oxford: Oxford University Press, 1995. – 599 p.
9. Reps J.W. The making of urban America: city planning in the United States. – New Jersey: Princeton University Press, 1965. – 574 p.
10. Морозова Е.Б. Промышленная архитектура // Белорусская архитектура XX – начала XXI века / А.С. Сардаров, Г.А. Потаев, С.А. Сергачев и др. – Минск: Беларусь, 2020. – С. 138–206.
11. Морозова Е.Б. «Корпоративная идентичность» как явление в архитектуре объектов производства // Архитектура: сб. науч. тр. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: А.С. Сардаров (гл. ред.). – Минск: БНТУ, 2021. – Вып. 14. – С. 188–195.

REFERENCES

1. Morozova, E.B. (2014). *Ot promyshlennogo poseleniya do tekhnoparka: territorial'nye ob"ekty promyshlennoi arkhitektury*. Minsk: BNTU. (In Russ.).
2. Morozova, E.B. (2017). *Promyshlennoe zdanie v istorii arkhitektury*. Minsk: BNTU. (In Russ.).
3. Krufft, H.-V. (1994). *A history of architectural theory: from Vitruvius to the present*. London: Zwemmer; New York: Princeton Architectural Press.
4. Zaleskaya, G.L. (2004). «Fabrichnye stroiteli» Belarusi kontsa XVIII–XIX vekov. *Vestn. Belorus. akad. arkhitektury*, (1), 56–57. (In Russ.).
5. Zaleskaya, G.L. (2006). Ogon' – mat' i machekha promyshlennoi arkhitektury. *Arkhitektura i str-vo*, (6), 42–45. (In Russ.).
6. Nikolaev, I.S. (1970–1978). Arkhitekturnoe obrazovanie. In *Bol'shaya Sovetskaya Entsiklopediya: 3-e izd., v 30 t. T. 2* (896–899). Moscow: Sovetskaya entsiklopediya. (In Russ.).
7. Lemoine, B. (1998). *Architecture in France, 1800–1900*. NY: Harry N. Abrams.
8. Kostof, S. (1995). *A history of architecture. Settings and rituals*. NY, Oxford: Oxford University Press.
9. Reps, J.W. (1965). *The making of urban America: city planning in the United States*. New Jersey: Princeton University Press.
10. Morozova, E.B. (2020). Promyshlennaya arkhitektura. In A.S. Sardarov (Eds.), G.A. Potaev (Eds.), S.A. Sergachev (Eds.), E.B. Morozova (Eds.), V.G. Arabei (Eds.), E.E. Nitievskaya (Eds.) & Yu.A. Protasova (Eds.) *Belorusskaya arkhitektura XX – nachala XXI veka* (138–206). Minsk: Belarus'. (In Russ.).
11. Morozova, E.B. (2021). «Korporativnaya identichnost'» kak yavlenie v arkhitekture ob"ektov proizvodstva [«Corporate identity» as a phenomenon in industrial architecture]. In A.S. Sardarov (Eds.) *Arkhitektura: sb. nauch. tr., vyp. 14* [Architecture (Vol. 14)] (188–195). Minsk: BNTU. (In Russ., abstr. in Engl.).

Поступила 05.03.2025

THE DEVELOPMENT OF THE ARTISTIC CATEGORY IN INDUSTRIAL ARCHITECTURE IN BELARUS

YE. MOROZOVA

(Belarusian National Technical University, Minsk)

In historical retrospect it is considered the development of architectural and artistic aspects of industrial design. Belarussian practice is presented in the time interval of the 19th – early 21st centuries with an emphasis on following global trends and regional peculiarities.

Keywords: industrial architecture, utilitarian buildings, architectural style, artistic techniques, functional approach, reflection of historical styles.

УДК 624.131.1

DOI 10.52928/2070-1683-2025-40-1-23-28

**ВЫБОР ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТОВ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ
ВЫСОКИХ НАСЫПЕЙ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ**

канд. техн. наук **А.Н. НЕВЕЙКОВ¹⁾**, канд. техн. наук **В.В. ТАЛЕЦКИЙ²⁾**,
В.Н. ДЕДОК³⁾, **А.В. ЛУКАСЕВИЧ⁴⁾**

^(1), 2), 4) *Белорусский государственный университет транспорта, Гомель,*

³⁾ *Брестский государственный технический университет)*

¹⁾ *geomonolith@gmail.com*

В статье приведен обзор программного обеспечения для расчета устойчивости откосов в условиях плоского напряженного состояния и результаты их опробования для решения представленной тестовой задачи. В качестве примера была принята высокая насыпь земляного полотна железной дороги из однородного грунта. Для расчетов применяли программное обеспечение, основанное как на аналитических (метод предельного равновесия), так и на численных (метод снижения прочности) методах расчета.

Ключевые слова: *насыпь, устойчивость откоса, поверхность скольжения, коэффициент устойчивости, методы расчета устойчивости, метод предельного равновесия, метод Шахунянца, метод снижения прочности.*

Введение. Проблема оценки устойчивости откосов является весьма актуальной. Необходимость решения задач об устойчивости откосов высоких насыпей земляного полотна железных и автомобильных дорог, армированных геосинтетическими материалами и нагельно-свайными конструкциями, поставила вопрос о выборе программного обеспечения для выполнения их расчетов. Для этого рассмотрены программы, имеющиеся в проектных организациях, где студенты и магистранты проходят практику, а также программы, находящиеся в свободном, триальном или демонстрационном доступе, ограничения которых обеспечат их опробование при решении представленной ниже тестовой задачи в плоской постановке с учетом введения в последующем удерживающих и армирующих материалов и конструкций. Это не исключает применения проектировщиками других программ для решения подобных задач.

Общие сведения о методах расчета устойчивости откосов и определении их коэффициента устойчивости. В настоящее время имеется большое разнообразие программ, применимых для расчета устойчивости откосов и склонов и разработанных для упрощения решения таких задач. Среди программ существуют как узкоспециализированные программы, основанные на аналитических методах расчета, так и универсальные, которые основаны на численных методах, предназначенных для решения широкого спектра задач, в том числе и геотехнических. Такое разделение зависит от применяемых методов расчета, которые удовлетворяют условию предельного или статического равновесия – по круглоцилиндрическим и произвольным поверхностям скольжения (аналитические) или снижения прочностных характеристик грунтов (численные).

Оценка степени устойчивости откоса в программах определяется вычислением коэффициента устойчивости ($K_{уст}$), который сравнивается с нормативным его значением ($K_{ст}$), установленным действующими ТНПА. Коэффициент устойчивости в аналитических методах расчета определяется как отношение сил (моментов), удерживающих массив грунта на наклонной поверхности, к силам (моментам), сдвигающим этот массив, а в численных методах расчета – как отношение прочностных характеристик грунта, заданных в программе, к их рассчитываемым программой предельным значениям, при которых происходит разрушение оснований и откосов.

Описание основных методов расчета, применяемых в программах, приведено во многих публикациях, которые посвящены проблеме устойчивости откосов, технических руководствах к программам и подробно нами не рассматривается. При этом отметим, что среди аналитических методов расчета в большинстве зарубежных программ отсутствуют отечественные методы, а численные в сравнении с аналитическими методами имеют ряд преимуществ, позволяя выполнять более точные расчеты для сложных инженерно-геологических условий, в том числе и при армировании геосинтетическими материалами и нагельно-свайными конструкциями. Применение методов предельного равновесия целесообразно для несложных задач, предварительного вариантного проектирования и окончательной проверки принятого проектного решения. Данные методы имеют ряд упрощений и допущений, но при этом обеспечивают получение достаточно достоверных и точных для практики результатов при решении задач в простых и средней степени сложности инженерно-геологических условиях.

Все аналитические методы теории предельного равновесия учитывают ряд допущений [1]:

- используется гипотеза затвердевшего тела;
- рассматривается узкий участок склона шириной 1 метр, а условия его работы принимаются для всего склона без учета его пространственной работы;
- принимается определенная форма поверхности скольжения;
- принимаются допущения о гидродинамических и сейсмических воздействиях;
- принимается определенный учет сил взаимодействия между отсеками, на которые разбивается оползневый блок.

При расчетах методами предельного равновесия задаются начальной поверхностью скольжения, после чего путем последовательных приближений с использованием характерных точек определяется положение критической поверхности скольжения с минимальным значением коэффициента устойчивости.

Среди большого разнообразия методов расчета устойчивости выделяют всего четыре способа или класса, отличающиеся своей оригинальной системой сил, действующих на отсеки (Крея, Свена – Гультена, Терцаги, Феллениуса). Другие известные способы, например, Бишопа, Маслова, Шахунянца, касаются главным образом только механизма расчетов или учета тех или иных дополнительных усложняющих элементов. Методы расчета делятся по механизму расчета на удовлетворяющие общему равновесию моментов, равновесию сил, равновесию моментов и сил, а по учету сил взаимодействия между отсеками – на учитывающие только основные силы, учитывающие горизонтальные (касательные) силы взаимодействия отсеков, учитывающие вертикальные (нормальные) силы взаимодействия отсеков, учитывающие вертикальные (нормальные) и горизонтальные (касательные) силы [2].

Таким образом, по полноте учета факторов (таблица 1) методы Моргенштейна – Прайса и Спенсера являются наиболее достоверными, и рассчитанный по ним коэффициент устойчивости следует в общем случае проектирования, если иное не оговорено нормами проектирования, сравнивать с нормативным его значением ($K_{уст} \geq K_{ст} = 1,1 \dots 1,4$). Методы Феллениуса, Шахунянца, Янбу являются консервативными, так как занижают устойчивость и могут применяться для проверки устойчивости относительно состояния предельного равновесия ($K_{уст} \geq 1$) [2].

Важно также отметить, что каждый из этих методов имеет свою область применения. Среди методов расчета есть те, которые нашли широкое применение в конкретных отраслях строительства. Например, метод Шахунянца является основным при проектировании откосов земляного полотна железных дорог¹.

Таблица 1. – Факторы, учитываемые в основных аналитических методах расчета²

Метод расчета	Общее уравнение моментов ($\Sigma M_i = 0$)	Общее уравнение сил ($\Sigma F_i = 0$)	Нормальные (вертикальные) силы взаимодействия между отсеками	Касательные (горизонтальные) силы взаимодействия между отсеками
Горизонтальных сил	–	+	–	–
Касательных сил	–	+	–	–
Феллениуса	+	–	–	–
Шахунянца	–	+	+	–
Бишопа	+	–	+	–
Янбу	–	+	+	–
Моргенштейна – Прайса	+	+	+	+
Спенсера	+	+	+	+

Примечание. «+» – учитываются в методе; «–» – не учитываются в методе.

Большинство аналитических методов расчета устойчивости основывается на положениях теории предельного равновесия, при рассмотрении грунтового массива с точки зрения критерия прочности Кулона – Мора, согласно которому разрушение грунта происходит в виде сдвига по поверхности с наименьшей несущей способностью, определяемой его прочностными характеристиками: сцеплением и углом внутреннего трения. Решение такого рода задач обеспечивается связью между нормальными и касательными напряжениями. Несколько другой алгоритм расчета использован при выполнении расчетов численными методами. Если аналитические методы подразумевают предварительное нахождение потенциальных поверхностей скольжения, а затем выполнение по ним расчета устойчивости с определением наименее устойчивой конфигурации склона, то в численных методах этот недостаток отсутствует, так как применяется метод снижения прочности (*SRM – shear reduction method*).

Суть данного метода заключается в одновременном снижении показателей прочностных характеристик – угла внутреннего трения (ϕ) и удельного сцепления грунта (c). При этом возникающие в массиве деформации оцениваются для каждой итерации, вплоть до наступления момента разрушения грунта. Положение поверхности скольжения формируется автоматически исходя из величины возникающих в массиве деформаций. Таким образом, программой одновременно выполняются расчет коэффициента устойчивости склона и нахождение наиболее опасной поверхности скольжения. При расчете методом снижения прочности нет необходимости учитывать предпосылки или упрощения относительно аналитических методов.

¹ ТКП 45-3.03-163-2009. Железные дороги. Земляное полотно. Правила проектирования. – Минск: Минстройархитектуры Респ. Беларусь, 2010. – 99 с.

² Руководство пользователя к программе «GEO-stab. Расчет устойчивости склонов и откосов». URL: <https://malininsoft.ru/GeoStab-UserGuide>.

Следует отметить, что разработчики аналитических методов расчета устойчивости не предполагали применения в своих методах специальных удерживающих конструкций для укрепления склонов и откосов, учет которых введен в методы разработчиками программного обеспечения, поэтому, основываясь на отмеченных недостатках аналитических методов, численным расчетам следует отдавать предпочтение.

Обзор программного обеспечения и анализ сложности его применения. Наличие многочисленных программ и имеющихся в них методов расчета ставит вопрос об их применимости для решения поставленных задач.

Для успешного решения поставленных задач программа должна предоставлять пользователю развитый набор функций по подготовке исходных данных, обработке результатов расчета и их документированию, а также соответствовать современным алгоритмам расчета.

В зависимости от степени соответствия данным критериям, легкости и универсальности применения все программы по своей мощности и эффективности условно можно разделить на три группы:

1) простые – *SLIDE*-Балтпроект-4.0, *ОТКОС*-5.01, *ЭСПРИ*-устойчивость склона, *SCAD*-откос, *SLOPE-stability*, *ДКУ*-4.0 и др.;

2) средние – *STAB*-3.3, *GEO-stab*, *ГЕО5*-устойчивость откоса, *GenID32*, *GEOSTUDIO-slope/w*, *ROCSCINE-slide*, *HIRCAN* и др.;

3) сложные (в перечень включены только геотехнические программы) – *ADONIS*, *ГЕО5*-МКЭ, *FLAC*, *ROCSCINE-RS*, *PLAXIS*, *MIDAS*, *Z-SOIL*, *SiO-2d* и др.

Программы первой группы просты в освоении, но требуют координатного ввода очертаний откоса, границ грунта и уровня грунтовых вод, имеют ограниченное количество аналитических методов расчета и вводимых слоев грунта, требуют задания простого очертания слоев грунта, не поддерживают экспорт/импорт расчетных схем из графических программ, не позволяют формировать подробные отчеты о введенных данных и результатах расчета, не допускают применения специальных удерживающих конструкций для укрепления склонов и откосов.

Программы средней сложности достаточно просты в освоении. Большинство программ имеют удобный интерфейс с интерактивным вводом очертаний откоса, границ грунта, удерживающих конструкций, нагрузок и других данных, поддерживают экспорт/импорт расчетных схем из графических программ, используют большое количество аналитических методов расчета, позволяют выполнять стадийные расчеты и формировать подробные отчеты о введенных данных и результатах расчета. Во многих программах можно легко создавать и анализировать сложные модели для учета неоднородности сложения грунтового массива – выклинивающиеся слои, замкнутые линзы, удерживающие конструкции для укрепления склонов и откосов, подземные и грунтовые воды, наличие водоупорных слоев, влияние поверхностных и сейсмических нагрузок.

Программы третьей группы трудны в освоении, реализованы на численных методах расчета и предназначены для решения широкого спектра геотехнических задач со сложными расчетными схемами. Программы данной группы имеют разнообразные модели нелинейной работы грунта под нагрузкой и возможность моделирования различных конструкций, в том числе и удерживающих для укрепления склонов и откосов, допускают интерактивный ввод многих данных, поддерживают экспорт/импорт расчетных схем из графических программ, позволяют формировать отчеты о введенных данных и результатах расчета. Несмотря на то, что данные программы включают только один метод расчета (снижения прочностных характеристик грунта) для всех моделей грунта, он является альтернативным всем методам предельного равновесия. При расчете устойчивости данным методом программы уменьшают заданные расчетные значения угла внутреннего трения и удельного сцепления грунта и отслеживают момент, когда произойдут нарастание пластических деформаций в откосе и потеря его устойчивости. В результате расчета получаем коэффициент устойчивости откоса, который соответствует решениям с применением классических методов.

Программы, основанные на численных методах, как правило, выдают более точные результаты расчетов и имеют гибкие возможности моделирования, но при этом более сложны для самостоятельного освоения без прохождения специализированного обучения, требуют больше времени для выполнения расчетов, а также наличия опыта выполнения схожих расчетов.

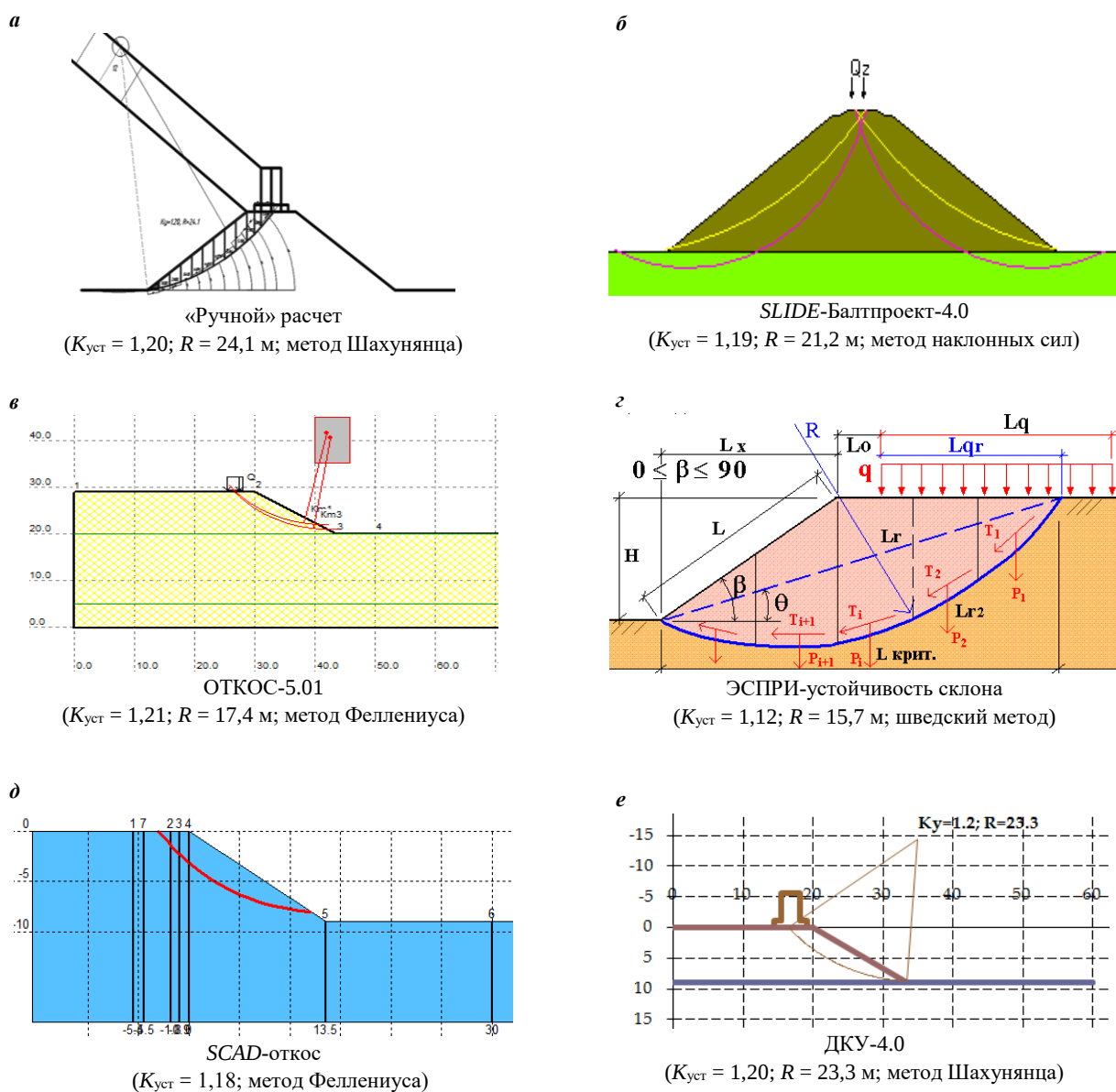
Тестовая задача, результаты ее расчета и их анализ. В качестве тестовой задачи при выборе программного обеспечения принята насыпь из дренирующих грунтов под однопутную железную дорогу высотой 9 м с крутизной откосов 1:1,5 и шириной основной площадки 6,6 м. Насыпь сложена из песка крупного с характеристиками $\gamma_1 = 18,1 \text{ кН/м}^3$; $\phi_1 = 36^\circ$; $c_1 = 1 \text{ кПа}$; $E = 38 \text{ МПа}$. Основанием насыпи служит песок мелкий с характеристиками $\gamma_1 = 18,5 \text{ кН/м}^3$; $\phi_1 = 32^\circ$; $c_1 = 2 \text{ кПа}$; $E = 28 \text{ МПа}$ и уровнем грунтовых вод на 2 м ниже подошвы насыпи. В большинстве программ для упрощения рассматривали решение для одностороннего откоса.

В тестовой задаче согласно ТКП 45-3.03-163-2009³ расчетная нагрузка от подвижного состава принята эквивалентной равномерно распределенной на ширине 2,7 м величиной 90 кПа, а расчетная постоянная нагрузка от веса рельс, шпал и балластного слоя принята равномерно распределенной на ширине 4,6 м величиной 20 кПа.

³ См. сноску 1.

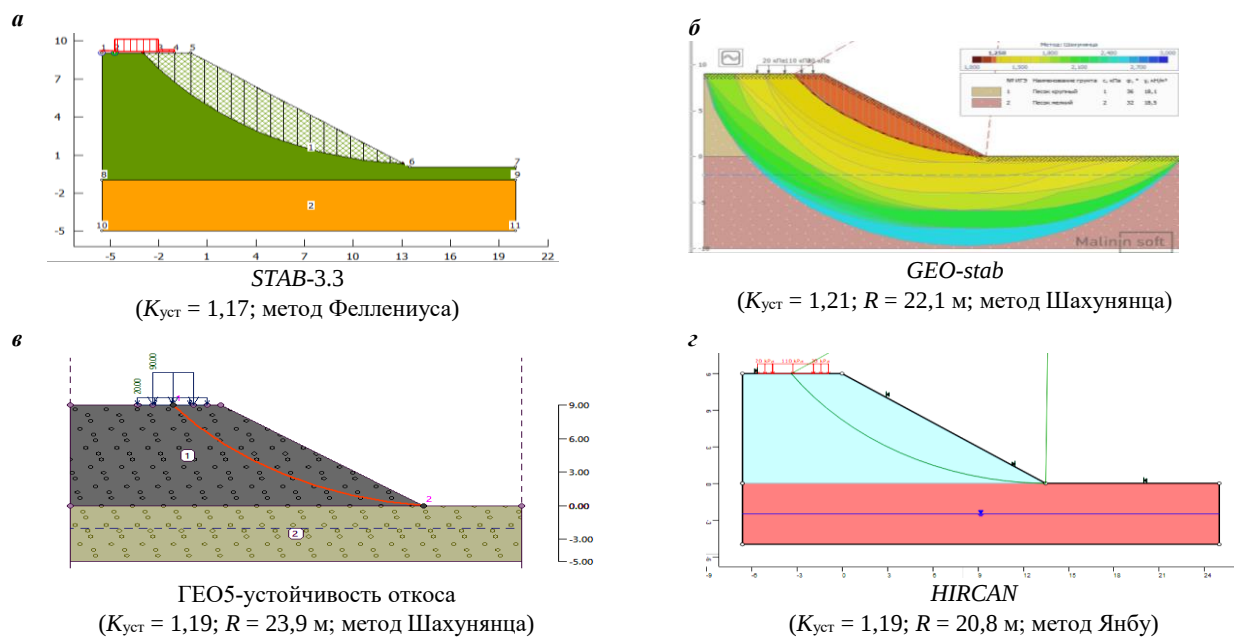
Тестовую задачу расчета устойчивости откосов решали «вручную» по методу Шахунянца, который определен требованиями ТНПА, как и в программах первой и второй групп, а при его отсутствии в программах – по методу Феллениуса или Ямбу. Эти методы являются наиболее консервативными, а соответственно, и надежными, так как по данным методам получены минимальные и близкие к методу Шахунянца коэффициенты устойчивости. В третьей группе программ при решении тестовой задачи для грунтов принята модель Кулона – Мора, а расчет выполнен методом снижения прочностных характеристик грунтов. Следует отметить, что в таком случае результаты численного решения по принятой модели Кулона – Мора для грунтов можно будет достаточно корректно сравнивать с результатами аналитических решений. Это объясняется тем, что параметры грунта и условие предельного состояния являются идентичными, а все параметры грунта данной модели содержатся в отчетах об инженерно-геологических изысканиях (удельный вес грунта – γ , кН/м³; удельное сцепление – c , кПа; угол внутреннего трения – ϕ , градусов; модуль деформации – E , МПа).

Далее на рисунках 1–3 (рисунки даны по номерам групп программ) приведены результаты расчета не менее чем по четырем программам в каждой группе. В результатах приведены: форма поверхности скольжения, значение коэффициента устойчивости, радиус поверхности скольжения, если его значение определяется в программе.



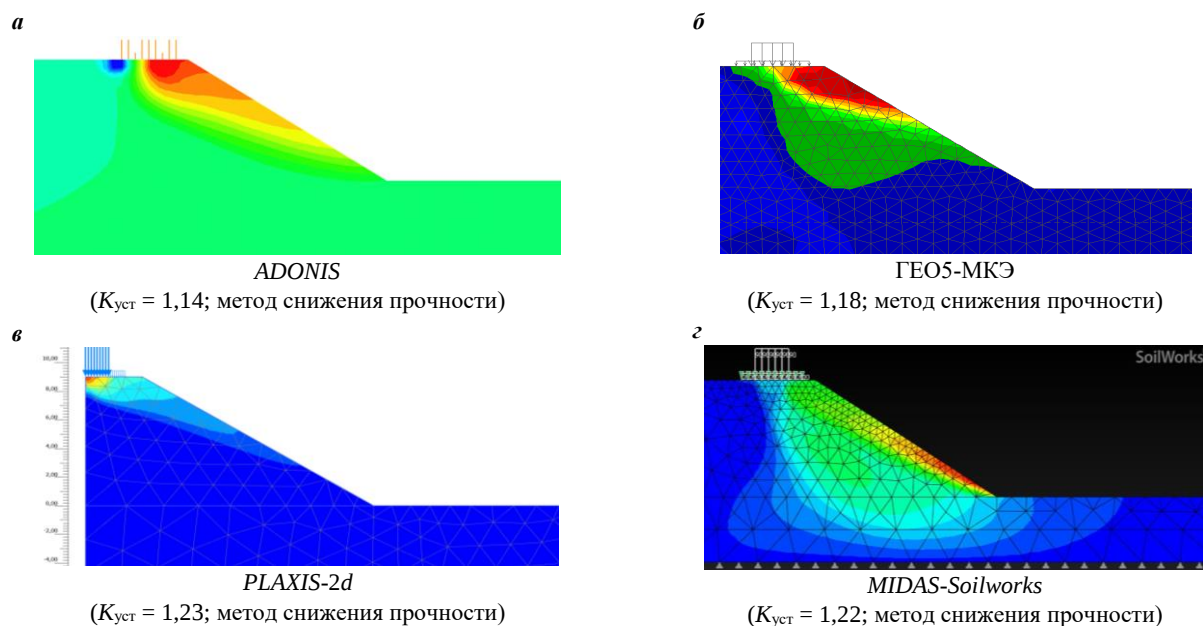
а – «ручного» расчета; **б** – SLIDE-Балтпроект-4.0; **в** – ОТКОС-5.01;
г – ЭСПРИ-устойчивость склона; **д** – SCAD-откос; **е** – ДКУ-4.0

Рисунок 1. – Результаты «ручного» расчета и в программах 1-й группы



а – STAB-3.3; б – GEO-stab; в – ГЕО5-устойчивость откоса; г – HIRCAN

Рисунок 2. – Результаты расчета в программах 2-й группы



а – ADONIS; б – ГЕО5-МКЭ; в – PLAXIS-2d; г – MIDAS-Soilworks

Рисунок 3. – Результаты расчета в программах 3-й группы

Опытное опробование рассмотренных программ на тестовой задаче позволило сделать некоторые выводы о возможности их применения для дальнейшего решения поставленных задач. В большинстве рассмотренных расчетных программ при принятых одинаковых исходных данных для тестовой задачи получены схожие с небольшим отличием от «ручного» расчета по методу Шахунянца значения коэффициента устойчивости откоса ($K_{уст} = 1,17 \dots 1,23$) и положения критической поверхности скольжения, а в программах «ADONIS» и «ЭСПРИ-устойчивость склона» – несколько заниженные значения ($K_{уст} = 1,14$ и $K_{уст} = 1,12$ соответственно). Различия в значениях коэффициента устойчивости откоса объясняются применяемыми методами расчета и точностью настроек детализации в них при автоматизации поиска предельных значений во время выполнения расчета. Для наглядности результаты расчетов устойчивости откоса тестовой задачи в опробованных программах сведены в таблицу 2.

Таблица 2. – Результаты расчетов устойчивости откоса тестовой задачи

Показатель в программе	Наименование программы													
	Ручной расчет	SLIDE-Балпроект-4.0	ОТКОС-5.01	ЭСПРИ-устойчивость склона	SCAD-откос	ДКУ-4.0	STAB-3.3	GEO-stab	ГЕО5-устойчивость откоса	HIRCAN	ADONI	ГЕО5-МКЭ	PLAXIS-2d	MIDAS-Soilworks *
Метод расчета (обозначение)	Ш	НС	Ф	ШМ	Ф	Ш	Ф	Ш	Ш	Я	СП	СП	СП	СП (Ф, Я)
Коэффициент устойчивости ($K_{уст}$)	1,20	1,19	1,21	1,12	1,18	1,2	1,17	1,21	1,19	1,19	1,14	1,18	1,23	1,22 (1,19)
Радиус поверхности скольжения (R , м)	24,1	21,2	17,4	15,7	-	23,3	-	22,1	23,9	20,8	-	-	-	- (22,2)

Примечание. Расшифровка обозначений в таблице:

«Ф» – Феллениуса; «Ш» – Шахунянца; «Я» – Ямбу; «НС» – наклонных сил; «СП» – снижения прочности; «ШМ» – шведский метод;

«*» – программа допускает расчет методами предельного равновесия (результат не представлен на рисунке 2) и конечных элементов.

Заключение. На основании выполненного обзора имеющихся программ и опытного их опробования на тестовой задаче приняли, что для дальнейших расчетов устойчивости откосов высоких насыпей земляного полотна железных дорог наиболее приемлемыми являются программы «ГЕО5-устойчивость откоса» (альтернатива «GEO-stab») из-за возможности ввода специальных удерживающих и армирующих конструкций, простоты освоения, удобного интерфейса, возможности выполнения расчетов по методу Шахунянца, наличия подробного отчета по выполненным расчетам, а также «ГЕО5-МКЭ» (альтернатива «PLAXIS-2d») как программа для решения широкого спектра геотехнических задач.

Возможностей программ, входящих в единый расчетный комплекс «ГЕО5», достаточно для решения поставленных задач, так как применяемые в них алгоритмы уже прошли апробацию на практике [3] и имеют развитые технические руководства⁴.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рекомендации по выбору методов расчета коэффициента устойчивости склона и оползневого давления / Разраб. Л.К. Гинзбург. – М.: ЦБНТИ Минмонтажспецстроя СССР, 1986. – 123 с.
2. Федоренко Е.В. Метод расчета устойчивости путем снижения прочностных характеристик // Транспорт Российской Федерации. – 2013. – № 6 (49). – С. 24–26.
3. Геотехника и геосинтетика в вопросах и ответах: справочное пособие / Под ред. Е.В. Федоренко. – СПб., 2016. – 198 с.

REFERENCES

1. Ginzburg, L.K. (1986). *Rekomendatsii po vyboru metodov rascheta koeffitsienta ustoichivosti sklona i opolznego davleniya*. Moscow: TsBNTI Minmontazhspestroya SSSR. (In Russ.).
2. Fedorenko, E.V. (2013). Metod rascheta ustoichivosti putem snizheniya prochnostnykh kharakteristik. *Transport Rossiiskoi Federatsii*, 6(49), 24–26. (In Russ.).
3. Fedorenko, E.V. (Eds.) (2016). *Geotekhnika i geosintetika v voprosakh i otvetakh: spravochnoe posobie*. Saint Petersburg. (In Russ.).

Поступила 04.02.2025

THE CALCULATION SOFTWARE SELECTION FOR THE RAILWAY ROADBEDS HIGH MOUNDS SLOPE STABILITY

A. NEVEIKOV¹⁾, V. TALETSKII²⁾, V. DEDOK³⁾, A. LUKASEVICH⁴⁾
(¹⁾, ²⁾, ⁴⁾ Belarusian State University of Transport, Gomel,
³⁾ Brest State Technical University)

The paper is devoted to the slope stability calculating software overview and calculation testing results comparison in the flat formulation. A railway high embankment of homogeneous soil was taken for the example calculations. Software based on both analytical (limit equilibrium method) and numerical methods (shear reduction method) was used for the calculations.

Keywords: embankment, slope stability, sliding surface, stability coefficient, stability calculation methods, limit equilibrium method, Shakhunyants method, shear reduction method.

⁴ Технические руководства к программам «ГЕО5». URL: <https://www.finesoftware.ru/geotekhnicheskikh-raschetov/teoreticheskie-rukovodstva/>.

УДК 347.7(476.6)

DOI 10.52928/2070-1683-2025-40-1-29-39

ПОЛОЦКИЙ БЕРНАДИНСКИЙ МОНАСТЫРЬ: НАТУРНЫЕ ОБСЛЕДОВАНИЯ ЭТАЖЕЙ И ЧЕРДАКА КЕЛЕЙНОГО КОРПУСА

A.A. СОЛОВЬЁВ

(Национальный Полоцкий историко-культурный музей-заповедник)

В статье представлены итоги обследования этажей и чердаков келейного корпуса Полоцкого бернардинского монастыря. Осмотр помещений корпуса позволил выявить ряд переделок и закладок первоначальных оконных и дверных проёмов, ниш и сводов, разновременных наслоений окрасок в помещениях. Сохранность основных элементов планировки, внутренних несущих стен и сводов делают его уникальным объектом среди католических монастырских ансамблей на территории Полоцка. Здание обладает как редким архитектурно-археологическим потенциалом, так и наравне с ансамблем Полоцкого иезуитского коллегиума может быть признано своеобразной энциклопедией конструктивных решений, применяемых в монастырском строительстве в Полоцке в XVIII в.

Полученные результаты изучения келейного корпуса при сопоставлении с имеющимися письменными изображениями источниками позволяют восстановить не только первоначальное убранство его внешних фасадов, но и интерьеры его помещений в разные исторические периоды существования здания. Выявленные в результате исследований данные должны стать определяющими как в поиске нового функционального назначения корпуса, так и в принятии проектных решений и ведении строительных работ, направленных не только на сохранение, но и музеефикацию различных элементов конструкций и интерьеров памятника.

Ключевые слова: бернардинский монастырь, келейный корпус, чердак, натурные обследования, планы и разрезы.

Введение. После уничтожения в 1563 г. Полоцкого бернардинского монастыря монахи данного ордена вернулись в Полоцк только в 1696 г. по приглашению полоцкого воеводы Доминика Слушки. Но теперь они обосновались на левом берегу Западной Двины на территории Кривцова Посада, заняв участок верхней прибрежной террасы. С западной стороны он был ограничен Кривым ручьём (рисунки 1, 2), а с восточной – глубоким оврагом (окончательно он засыпан в середине XX в.). В то время жители Задвинья использовали его в качестве взвоза от реки. Сам монастырь, согласно плану 1802 г., вместе с садами и огородами занимал практически весь квартал между современными ул. Тусноловой-Марченко, Лепельской (ныне 23-х гвардейцев) и Дзержинского. Западной его границей был ручей.

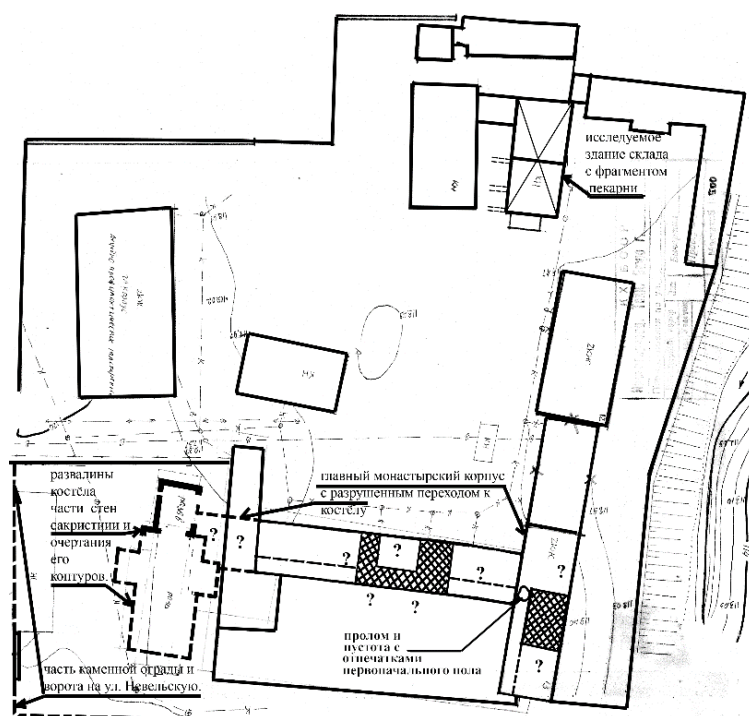
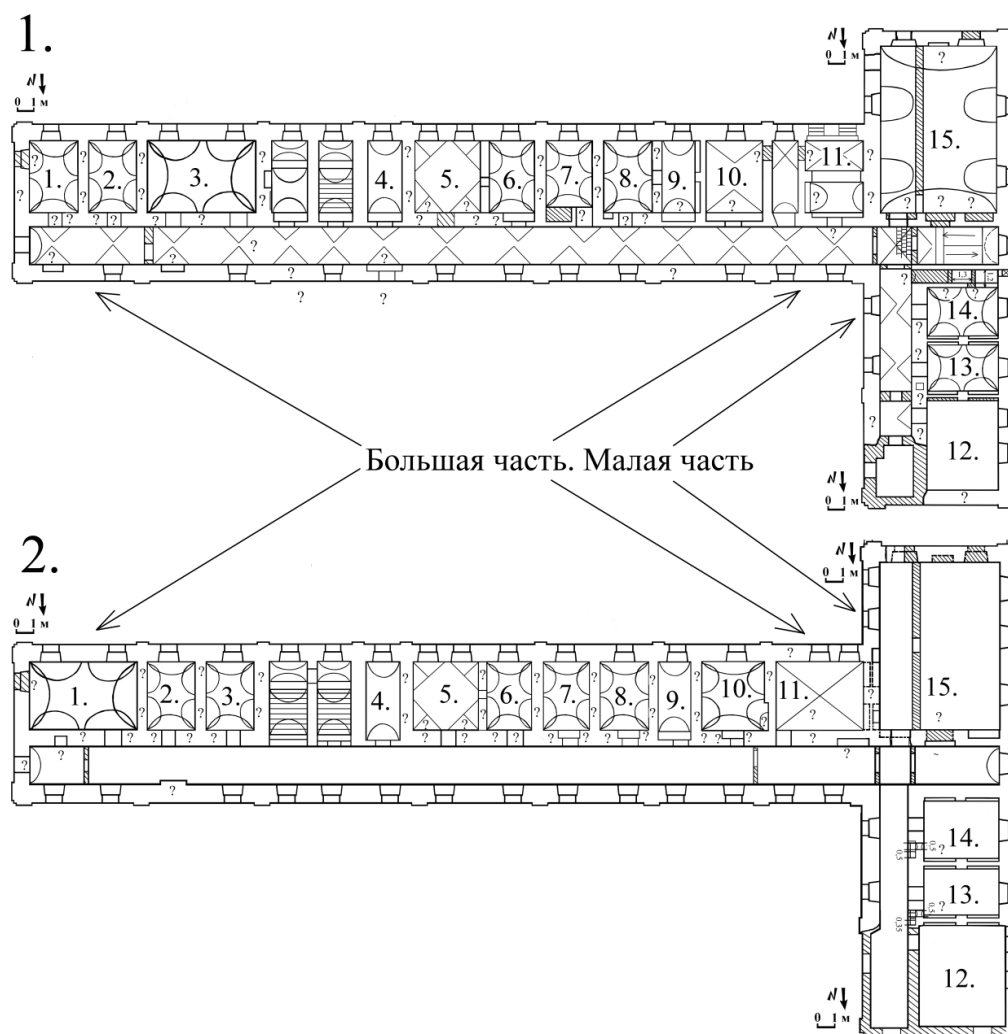


Рисунок 1. – Современный план территории бывшего бернардинского монастыря с обозначением подвалов главного корпуса (косой сеткой)



1. – план первого этажа; 2. – план второго этажа с частичными промерами. Косыми штрихами отмечена часть позднейших конструкций и закладок. Знаками вопросов – места, где требуются археологические шурфы/раскопки и зондажи на стенах/сводах (поиск первоначальных окрасок, закладок ниш и проёмов, если надо с удалением последних)

Рисунок 2. – Современный план главного корпуса бывшего бернардинского монастыря

При создании существующего ансамбля бывшего бернардинского монастыря его Т-образный главный келейный корпус возвели сразу после строительства костёла (см. рисунок 1). В 1832 г. монастырь был закрыт. В корпусе разместились причт Иоанно-Богословской церкви (перестроена из костёла) и приходская школа. После революции в монастыре была тюрьма НКВД, а после вывода тюрьмы здесь располагалась психиатрическая больница. За это время к южному и восточному торцу главного корпуса были пристроены здания (см. рисунок 1).

Основная часть. В 2001 г. предприятием «Белинформреставрация» проводилось обследование монастыря [1, с. 3]. Позже костёл и корпус изучали преподаватели и студенты ПГУ [2; 3]. Главный корпус состоит из двух частей. Назовём одну *Большой* (вдоль берега Двины), а другую – *Малой* (выходит торцом на реку); основная часть его помещений разделена капитальными стенами и сохранила своды (см. рисунок 2).

Малая часть корпуса. Обследование первого этажа данной части здания показало, что всю её южную сторону занимает огромный сводчатый зал – трапезная (помещение № 15). Зал был значительно выше остальных помещений корпуса, примерно в 1,5 раза. Свод лотковый с четырьмя распалубками и широкими низкими пятами, с профильными завершениями; следов металлических связей для погашения его распора в интерьере помещения выявить не удалось, но, с учётом незначительной толщины стен и полуциркульных очертаний свода, их наличие было обязательным. Например, такой металлический тяж имеется в интерьере уцелевшей сегодня части монастырской пекарни, свод которой представляет собой аналогичную конструкцию [4, с. 21: рисунок 3: 1 и с. 22: рисунок 4]. В южной торцевой стене зала первоначально располагалось два окна, в простенке между ними имелась ниша с барочным обрамлением для установки священного изображения (иконы или распятия). Второе окно в восточной стене трапезной пробили позже, при устройстве коридора психбольницы, ведущего в пищеблок. Ещё три первоначальных окна имелись в боковых стенах: одно – в восточной и два – в западной (см. рисунок 2: 1).

В северной стене трапезной прослеживаются очертания замурованного первоначального входа, размещённого по центру, и боковых ниш с левой стороны от него. Следы аналогичных ниш с правой стороны проследить не удалось: сегодня на этом месте пробит существующий вход в помещение. Он, как и капитальная перегородка, разделяющая зал, был устроен в период размещения в здании психиатрической больницы при возведении пристройки с кухней. В результате данной перестройки был образован коридор, для освещения которого пробили и новое дополнительное окно в пяте свода.

С восточной стороны зал частично межевал с помещением № 11 в Большой части монастырского здания (см. рисунок 1). Судя по его расположению, первоначально здесь была устроена кухня: аналогичное размещение имело место и в Полоцком иезуитском коллегиуме [5, с. 42–43]. На разделяющей стене имеются встроенные шкафы и различные перекладки; там, скорее всего, первоначально располагался проход или раздаточное окно [5, с. 42–43]. За трапезной начинался коридор, который отделял описанный выше зал от остальной части здания и продолжался в Большой части (см. рисунок 1). Здесь, в Малой части корпуса в конце коридора в XX в. при приспособлении здания для нужд больницы была устроена дополнительная лестница на двутавровых швеллерах, для чего часть межэтажного свода разобрали, а под его распалубку (где она имеет горизонтальный профиль) на месте среза подвели дополнительную опорную арку. Тогда же, вероятно, был замурован первоначальный вход в трапезную и пробит новый (см. рисунок 1).

Вся северная сторона Малой части бывшего келейного корпуса была занята кельями и малым коридором. Кельи (помещения № 13 и № 14) разделяли капитальные стены с двумя арочными нишами и своды с распалубками (см. рисунок 2), аналогичные тем, что имеются в бывшем Полоцком иезуитском коллегиуме. Их габариты определяли форму и размеры стоявших некогда в здании первоначальных печей [5, с. 43]. Стена между коридором и прилегающей кельей № 14 толщиной около 1,3 м со стороны кельи и коридора хранит следы переключков, малозаметных снаружи, связанных с замурованной лестницей, ведущей в подвал. Арочные ниши данной стены со стороны кельи имеют ряд перестроек.

Северная часть здания, где сегодня находится помещение № 12, сильно пострадало во время войн и было перестроено на остатках первоначальных стен (см. рисунок 2). Новые стены были тоньше, а перекрытия изготовили из дерева. Судя по имеющимся фотоснимкам помещения, его повреждения были связаны с артиллерийскими дуэлями Советско-польской войны 1919 г., после которой уцелевшие части стен были поправлены и накрыты кровлями¹ [6, с. 213]. Уже в ходе отстройки корпуса после Великой отечественной войны данная часть была восстановлена по аналогии с сохранившимися южной и восточной.

Второй этаж Малой части аналогичен по планировке первому. Над трапезной располагалось обширное, но низкое помещение № 15, так же разделяемое капитальной перегородкой толщиной в кирпич, которая отделяла коридор, ведущий в пищеблок (см. рисунок 1 и 2: 1). В южной и северной стенах имелись замурованные глубокие ниши. Вход также располагался по центру северной стены и был замурован при устройстве лестницы в XX в.

Северная сторона второго этажа Малой части разрушена сильнее. Сводчатые кельи и коридор частично сохранились, но гораздо хуже, чем на первом этаже. Их поперечные стены также были двухарочными. Продольная стена между кельями и коридорами сохранилась практически полностью, уцелел даже первоначальный дверной проём помещения № 12. В начале 2000-х гг. в её толщу были врезаны шкафы, повредившие дымовые каналы. В несущей стене между кельями № 13 и № 14 и коридором удалось обследовать каналы первоначальных дымоходов (0,45×0,5 м). Со стороны келий в них вели замурованные повреждённые арки шириной 0,5 м; одна из них высотой 1,4 – 1,5 м (см. рисунок 2: 1).

Большая часть корпуса. Планировка первого и второго этажей практически одинакова, все помещения сохранили сводчатое перекрытие. Своды келий различной конструкции – лотковые с распалубками, цилиндрические, крестовые. Между кельями преобладали стены с двумя арочными нишами. Ряд помещений своим устройством и интерьером полностью повторял кельи Полоцкого иезуитского коллегиума, только в уменьшенном виде [5, с. 43]. Многие из ниш были замурованы или растёсаны, изменены высота и очертания откосов ряда дверных проёмов. В южной стороне здания между помещениями № 3 и № 4 имеется первоначальная обширная сводчатая лестница. Помещение № 5 и коридор между помещениями № 10 и № 11 служили входами в здания (см. рисунок 2). Окна в восточной фасадной стене данной части здания на обоих этажах в помещениях № 1 были заложены при возведении на остатках перехода между храмом и келейным зданием для психиатрической больницы новой двухэтажной пристройки в XX в.

Обследование помещений № 1–№ 3 на обоих этажах показали, что они фактически представляли собой единый блок, состоявший из двух малых и одной большой келий. Их расположение на обоих этажах не совпадало. Под малыми кельями № 2 и № 3 второго этажа располагалось просторное помещение № 3 на первом этаже, имевшее массивный лотковый свод с распалубками толщиной около 0,3 м (в кирпич), достаточный, чтобы выдерживать массив несущей двухарочной с нишами (?) стены, разделяющей и держащей своды помещений № 2 и № 3

¹ Дейнис И.П. Полоцк в XX веке (1905–1967 гг.). Рукопись. – Фонды НПИКМЗ, КП-5 2774, экз. № 5 781 26.04.1972. – С. 85, 87, 93, 95.

второго этажа (см. рисунок 1). Ряд перекладок и пробитых ниш имеется в каморе под лестницей, в стене, смежной с помещением № 3 на первом этаже.

Обращает на себя внимание необычная толщина северной стены помещения № 7. Судя по неровной поверхности и отверстиям, в её толще имеются полости, которые могут быть связаны с наличием замурованных первоначальных проёмов, ниш и ходов, ведущих в подвал. Там же имеется замурованный проём с кирпичной ступенькой [7, с. 108: рисунок 3: 5 и с. 109: рисунок 6]. Первоначален ли вход со стороны коридора в эту келью – остаётся неясным (см. рисунок 2: 1).

Небольшой коридор-проход между помещениями № 10 и № 11, вероятно, сообщался с ними через проходы в южной части, что может подтверждаться наличием в своде распалубок, устроенных над замурованными проёмами. Помещение № 11 первого этажа, смежное с Малой частью (помещение № 15), имеет перестройки. Вероятно, первоначально оно состояло из двух частей, которые разделяла мощная неровная арка (пробита на основе капитальной стены (?)). В его южной наружной стене замурован широкий арочный проём, в закладке которого располагались два окна. Но эта стена была гораздо тоньше. Подобная арка есть и в северной стене, и нынешний вход в помещение, вероятно, более позднего происхождения. Перекладка свода северо-восточной части помещения может быть связана с замурованной лестницей или остатками оборудования некогда располагавшейся здесь кухни (см. рисунок 2: 1).

Помещения № 4–10 на уровне второго этажа по своей планировке и устройству сводов практически полностью повторяют кельи первого этажа. Помещение № 11 второго этажа отличается от расположенного ниже, оно накрывает как расположенное под ним, так и коридор-проход. Сверху помещение № 11 перекрыто крестовым сводом (см. рисунок 2: 1).

Обследование первоначальной лестницы, ведущей на чердак, показало, что изначально строители планировали устроить келью: на неоштукатуренных стенах видна система арок и штраба, приготовленная для устройства сводов, частично уцелел кирпичный пол и кладки ступенек из кирпича на ребро, в центре лестница повреждена. Данные конструкции имели аналогии в Полоцком иезуитском коллегиуме, представленные выкладом подоконников, ступеней лестниц, полов жилых и производственных помещений, прямков [5, с. 36, 38, 64–67, фото 24 и 25 на вкл. IV и фото 84 на вкл. XI].

В рамках проведенного нами исследования, особый интерес представляют поэтажные чертежи и разрезы здания, созданные после упразднения бернардинского монастыря в период окончания польского восстания 1831 г. российскими властями в рамках ревизии и приспособления помещения к новым функциям. Несколько цветных графических листов с изображением Полоцкого бернардинского монастыря были объединены в одно дело под общим названием «Планы, фасада, и профили бывшего монастыря Бернардинского ордена в г. Полоцке Витебской губернии. Проект на перестройку церкви при Бернардинском монастыре. План местности и строений бывшего Бернардинского монастыря. Арх. Порт. Рассмотрены и одобрены по журналу Совета путей сообщения и публичных зданий 9 марта 1838 г. Копии», составленное в 1838 г. Данный документ был обнаружен и опубликован И.Н. Слюньковой [8, с. 161] (рисунок 3).

Согласно данному документу, помещения № 1–№ 3 в Большой части здания представлены в виде четырёх келий, разделённых капитальными несущими стенами, что может говорить либо о неточности изображения, либо о случившихся перестройках. Входы в подвал располагались только внутри здания и были обращены в помещения № 7 в Большой части и № 14 в Малой части (см. рисунок 2: 1 и рисунок 3). Помещение № 9 по данным чертежа 1838 г. изначально было сенями с выходом, ведущим во двор, позже его перенесли в коридор-проход между помещениями № 10 и № 11, бывший ранее составной частью помещения № 11 (их разделяли только столбы (остались после выноса стены?), держащие своды). Судя по чертежу 1838 г., будущий коридор-проход связывал данное помещение как с улицей, так и с главным коридором (см. рисунки 2 и 3). Помещение № 12, расположенное на первом этаже в Малой части здания, первоначально состояло из комнаты и коридора-прохода (?), через который соединялось с главным коридором.

Уборные монастыря были вынесены за пределы корпуса и представляли собой двухэтажное деревянное сооружение, которое было связано через тамбур как с улицей, так и с дверным проёмом в помещение № 4, расположенное возле лестницы, которое играло роль своеобразных сеней.

Обращает на себя внимание прясло северной стены коридора, расположенной против первоначальной лестницы здания между помещениями № 3 и № 4. Длина прясла значительно больше остальных, при том что размещается в нём только одно окно и дверь первого этажа (вероятно, более позднего происхождения). На уровне подвала в данной стене нет окон, но именно здесь прослеживаются арки замурованных тоннелей и сильно заглублённые ниже уровня существующего пола подвала ниши в южной стене коридора [7, с. 108–109].

Таким образом, это может косвенно указывать на расположение в данном месте дополнительного объёма монастырского корпуса с треугольным фронтоном, известного только по рисункам монастыря на картах Литовско-Русской провинции 1817 и 1819 гг. [7, с. 109–110]. Была ли эта часть здания на самом деле и когда её разрушили – ответ могут дать лишь зондажные работы на данном прясле фасада и археологические исследования прилегающей к нему территории. Любопытно, что на чертежах и планах 1838 г. стена в данном месте указана как тщательно оштукатуренная и примет утраченной пристройки на ней не зафиксировано.

При сравнении изображений помещений № 15 на первом и втором этажах в Малой части на чертеже 1838 г. [8, с. 161] с имеющимся сегодня, обращает на себя внимание, что над залом на втором этаже располагались три

кегли, разделённые капитальными стенами (см. рисунок 3). Это может говорить либо о неточностях, допущенных составителем чертежа, либо о серьёзных перестройках в данной части здания. Тем более, что с учётом высоты свода трапезной (помещение № 15) возможность их создания сомнительна. В пользу проведенных/предполагаемых перестройках/ремонтах в здании на период 1838 г. говорит факт окраски ряда его несущих стен более тёмной тушью, особенно это касается помещений второго этажа Малой части (см. рисунок 3).

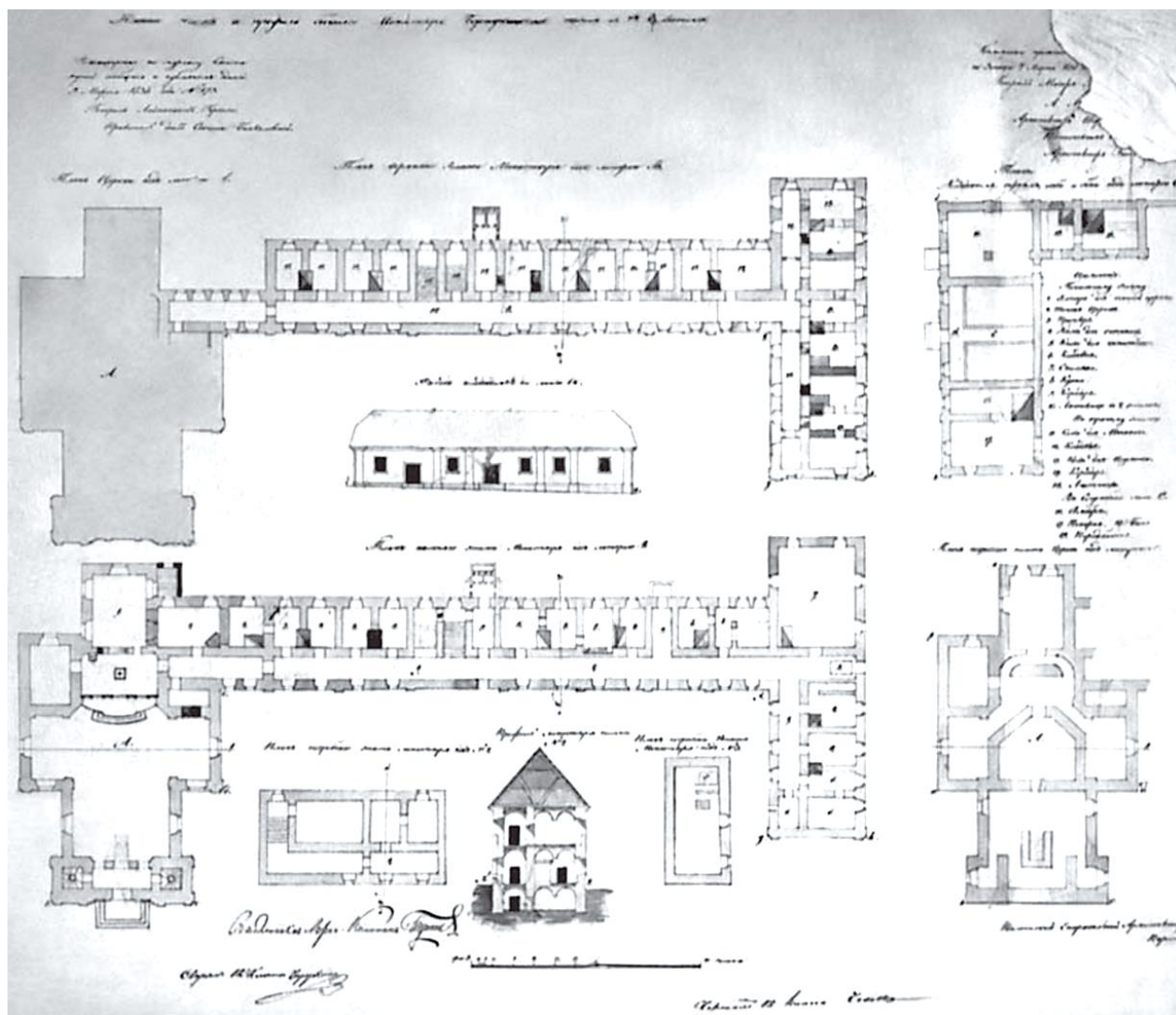
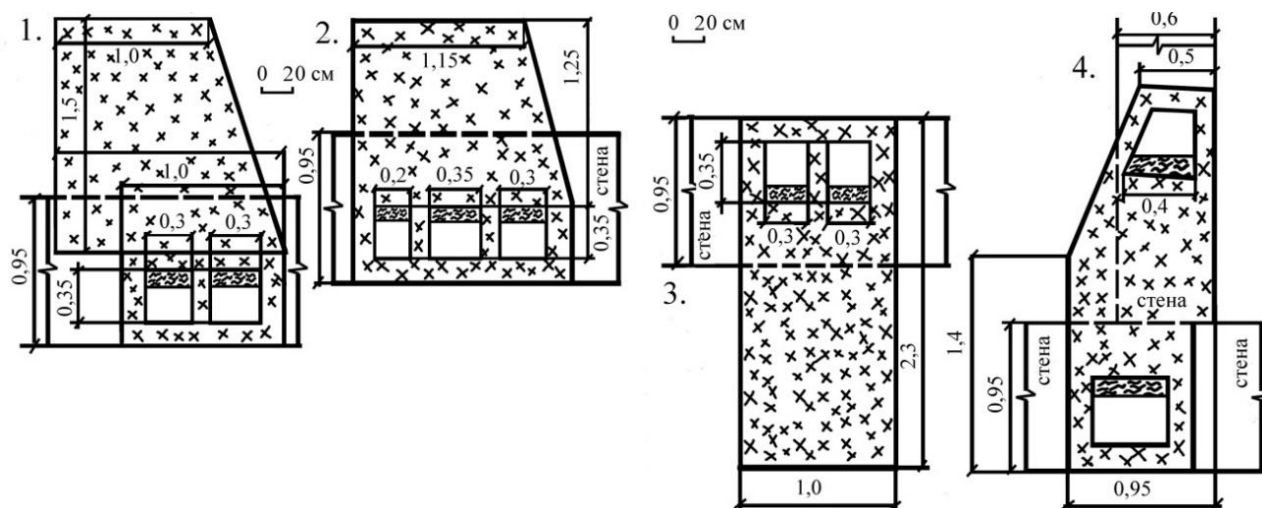


Рисунок 3. – Поэтажный план и поперечный разрез главного корпуса, костела и пекарни бывшего бернардинского монастыря в Полоцке, составленные в 1838 г., найденные И.Н. Слюньковой

Система отопления корпуса, согласно чертежу 1838 г., представлена печами, большинство которых было встроено в арки поперечных стен, что объяснялось небольшими размерами келий [8, с. 161]. С учётом замурованной арки в подвале Большой части здания, можно полагать, что в помещениях № 6 и № 7 печи отапливались из подвала через дымовые каналы, либо имелся гипocaust («тёплый пол») [7, с. 109–110]: подобное расположение топок этих отопительных систем выявлено при изучении корпуса «Б» бывшего Полоцкого иезуитского коллегиума [5, с. 50–52, 60–61]. Печи, поставленные в углу помещений № 5 на втором этаже и № 10 на первом, вероятно, являются результатом позднейших ремонтов (см. рисунок 3). Следов печи, стоявшей в трапезной (помещение № 15), сейчас практически не сохранилось. Судя по её расположению, она отапливалась со стороны коридора через печной проём, как большинство печей Полоцкого иезуитского коллегиума [5, с. 43: рисунок 15, с. 44], но её дымоход в толще стены был обращён к ближайшей трубе, расположенной на центральной оси (коньке) кровли. Такие же печные проёмы, судя по планам 1838 г., имели все кельи со стороны коридора. При этом, с учётом незначительной толщины данной стены келейного корпуса (около 1,0 м), арки печных проёмов были значительно меньше тех, что располагались в коллегиуме. В проломе со стороны подвала были видны завалы песка и бетонные конструкции от основания капитальной перегородки, отделявшей коридор, а на месте дымохода и печного проёма (?) в стене был пробит существующий ныне вход [7, с. 107].

Таким образом, не смотря на обширный комплекс сведений, полученных в рамках натурных обследований и содержащихся в обнаруженных документах 1838 г., окончательно об имевших место ремонтах и устройстве отопительных систем здания можно будет судить только по результатам археологических исследований, а также зондажных работ на стенах здания.

Чердак. В результате обследования чердака Малой части на уцелевших сводах келий были найдены площадки под трубы – кирпичные четырёхугольники размером $1,0 \times 2,0$ м (рисунок 4: 3), расположенные на сводах и поперечных стенах келий. Трубы были устроены в стороне от дымоходов, которые имели наклонные в их сторону каналы. Такое расположение связано с желанием архитекторов и строителей установить трубы на линии конька кровли для обеспечения хорошей тяги в печах и создания более изящного силуэта здания.



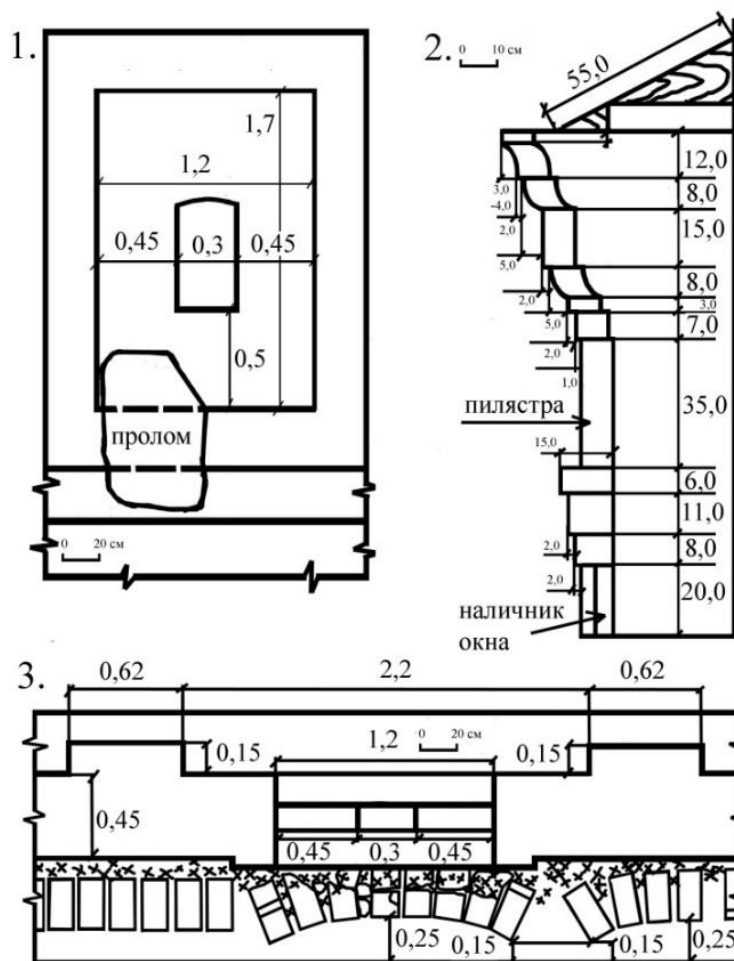
1. – помещения № 1–№ 2; 2. – помещения № 2–№ 3;
3. – помещения № 13–№ 14; 4. – помещения № 10–№ 11

Рисунок 4. – Основания под первоначальные печные трубы

На границе помещений № 12 и № 13 в северной части здания прослежены остатки фронтона, возведённого в первой половине XX в. при её частичном восстановлении в 20–30-х годах XX в., когда на остатках разрушенных первоначальных стен возвели одноэтажную пристройку. Частично сохранился только фронтон южного торца Малой части здания, первоначальные очертания его форм срублены. Также сохранилось первоначальное окно, размеры которого практически полностью повторяют окна келий. Завершающий его карниз позднего происхождения был выполнен при понижении уровня оконного проема. Со стороны чердака на стене фронтона имеется усиление в виде прямоугольных выступов, которые первоначально, вероятно, соединялись арками, образующая ниши различной высоты, как это нередко делалось в средневековых постройках.

Обследование чердака Большой части также позволило выявить некоторые четырёхугольные (трапециевидные) кирпичные площадки под трубы, поставленные на поперечные стены и своды келий. Близкие к квадрату дымовые каналы имели уклон в сторону местонахождения бывших труб. Обычно на одну трубу приходилось 2–3 канала, разделённых перегородками из кирпичей, поставленных на ребро, как это было в Полоцком иезуитском коллегиуме [5, с. 42, 43: рисунок 15, с. 55]. Характер расположения обнаруженных площадок также говорит о том, что первоначальные трубы должны были находиться на центральной оси (коньке кровли) корпуса (см. рисунок 4: 1, 2, 4).

Сегодня частично сохранился фронтон восточного торца здания, но его первоначальная высота понижена, и очертания форм утрачены. Завершающий его карниз также позднего происхождения. Фронтон сохранил первоначальное окно, которое позднее было частично замуровано, при перестройке было оставлено только небольшое арочное оконце (рисунок 5: 1). Со стороны чердака на стене фронтона имеется усиление в виде прямоугольных выступов, которые первоначально соединялись арками различной высоты, закрытыми скатами кровли, как это нередко делалось в средневековых постройках. Обследование его наружной стороны позволило выявить выкладки на выступе венчающего стены карниза. В их кладке – лекальный кирпич, аналогичный изделиям из Полоцкого иезуитского коллегиума [5, с. 35] (рисунок 5: 3). Ряды выкладок имеют изогнутые очертания, в них сохранились деревянные бруски для крепления отлива (?). Они, вероятно, более позднего происхождения и связаны с дополнительным украшением здания в бытность тут бернардинского монастыря. Карниз здания сохранился полностью, замурованы только окна этажей (см. рисунок 5: 2).



1. – обмеры первоначального окна на сохранившейся части восточного фронтона Большой части здания;
 2. – профили и обмеры венчающего карниза и завершения пилястры на восточном фасаде Большой части здания;
 3. – кирпичные выкладки на венчающем карнизе восточного фасада

Рисунок 5. – Некоторые архитектурные элементы восточного фасада Большой части здания

О первоначальном облике кровли и фронтонов главного монастырского корпуса можно также судить по комплексу графических материалов, зафиксировавших состояние монастырского ансамбля. Это карты Литовско-Русской провинции 1817 и 1819 гг. [9, с. 116, 117: рисунок 2], объединённые в одно дело чертежи, найденные и опубликованные И.Н. Слюньковой [8, с. 161], вид бывшего монастыря со стороны Задвинья, выполненный художником Д.М. Струковым. Наиболее позднее изображение здания до перестройки зафиксировано на фотографии ансамбля со стороны Западной Двины, сделанной в 1889–1891 гг. (рисунок 6) [10, с. 81; 11, с. 96–97].



Рисунок 6. – Бывший бернардинский монастырь фото 1889–1891 гг. до капитального ремонта кровли в 1894 г.
 Убранство северного фронтона Малой части здания

Изображения келейного здания на чертежах 1838 г. и фоторографии 1889–1891 гг. объединяет наличие высокой черепичной (имеет тёмный окрас) кровли, фронтоны которой представляют собой треугольники с углом между горизонтом (карнизом) и боковыми бёдрами около 45° . Такой угол уклона поверхности считался оптимальным для укладки керамической черепицы. По каким-то причинам составитель чертежа 1838 г. проигнорировал наличие дымовых труб и ряд элементов декоративного убранства фасадов здания – обрамления центральных окон, боковые окна/ниши и карнизы фронтонов (рисунок 7). О наличии их более богатого убранства говорит указанная выше фотография, отражающая состояние памятника в 1889–1891 гг. со стороны Западной Двины. Это северный торец Малой части здания. На изображении её фронтона, обращённого на реку, хорошо видны прямоугольное окно чердака и овальные (?) ниши с обеих сторон и над ним. Подобные прямоугольные окна были зафиксированы нами в ходе натурного обследования на сохранившихся частях первоначальных фронтонов восточного торца Большой части и южного торца Малой части здания. Там же зафиксированы и первоначальные дымовые трубы, расположенные по коньку кровли, о чём говорит и характер площадок под их основания, обнаруженных нами на уцелевших сводах на чердаке здания. Судя по сохранившимся площадкам и изображениям, это были квадратные в плане сооружения $1,0 \times 1,0$ м со стенками толщиной в кирпич (около 30 см), возвышавшиеся над коньком на высоту 0,5–0,7 м (см. рисунок 4).

Для сбора более полной информации о кровле здания необходимо проведение зондажных работ на уцелевших частях фронтонов Большой и Малой частей с целью поиска утраченных элементов декора (ниш и лепнины), а также раскопок завалов сброшенной черепицы для сбора образцов (на шипах пластин могут находиться клейма, как в Полоцком иезуитском коллегиуме), обмазки, позволяющих определить ширину обрешётки и смазки стыков черепиц. Также может потребоваться более детальное изучение и восстановление несущей способности металлических связей.

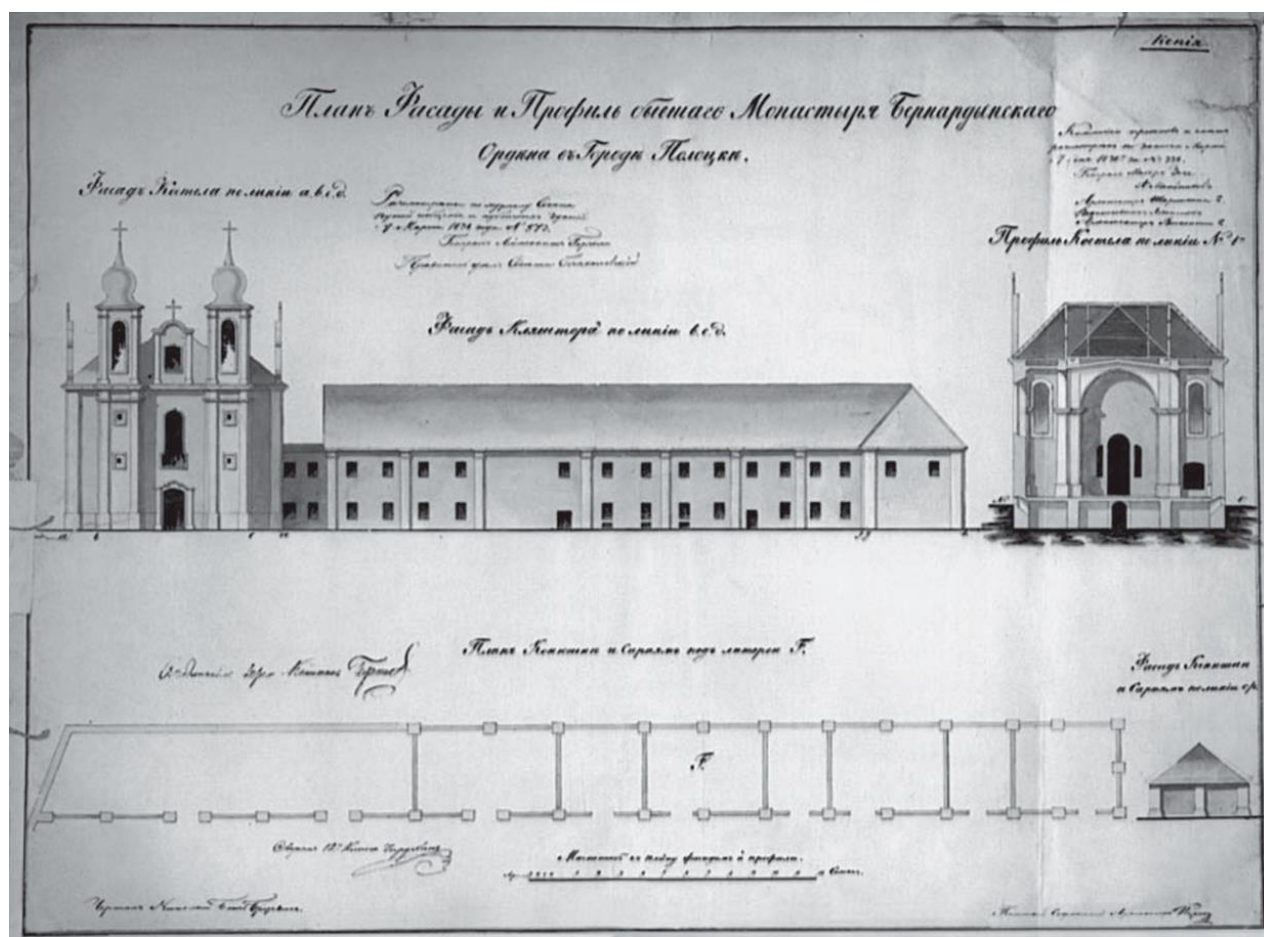


Рисунок 7. – Панорама фасадов костела и главного корпуса со стороны р. Западная Двина, поперечный разрез костела и план хозяйственных построек бывшего бернардинского монастыря в Полоцке, составленные в 1838 г., найденные И.Н. Слюньковой

Один из наиболее масштабных ремонтов корпуса приходится на конец XIX в. По данным «Полоцких епархиальных новостей» на 1895 г.: «Дом этот, вследствие того, что, со времени передачи его в Синодальное ведомство, ни разу не подвергался серьезному ремонту, постепенно приходил в ветхость. Только та часть дома, в которой помещался церковный причт, еще кое-как поддерживалась, остальные же части дома превратились положительно в руину». Капитальный ремонт здания был начат в 1894 г. с одновременным преобразованием имевшейся одноклассной церковно-приходской школы, основанной в 1885 г. (располагалась на первом этаже

в Малой части здания, обращённой в сторону Западной Двины), в двухклассную со столярным и слесарным отделением [12, с. 1089–1090, 1092]. После данного ремонта кровля здания приобрела современный вид. Часть печных труб возвели на прежних местах, но появились также и новые.

В ходе артиллерийских дуэлей Советско-Польской войны 1919 г. северный торец здания был сильно повреждён. Практически полностью были разбиты стены второго этажа и уничтожены своды угловых помещений и части коридора, а также угол первого этажа. Уцелела только продольная стена между коридором и кельями. При восстановлении здания на этих руинах была возведена одноэтажная пристройка с более тонкими стенами и отдельным входом, после чего руины закрыли отдельными скатными крышами (рисунок 8)².



Рисунок 8. – Бывший бернардинский монастырь, фото 30-х гг. XX в., на месте разбитого торца Малой части – одноэтажная пристройка с отдельным входом, посаженная на первоначальные стены здания

После устройства в 30-х годах XX в. в здании тюрьмы НКВД серьёзных ремонтов и перестроек бывшего монастырского корпуса практически не велось [6, с. 113]. В основном проводилась замена печей, оконных и дверных заполнений, побелка и покраска стен. Тогда же, вероятно, с улицы были пробиты и новые входы в подвалы, был разрушен переход, соединявший его с бывшим костёлом/церковью.

После Великой Отечественной войны в здании появилось центральное отопление, а разрушенный северный торец Малой части, обращённый в сторону Западной Двины, отстроили почти в прежнем виде (как он выглядел после ремонта 1894 г.). Тогда же, видимо, в коридоре Малой части разобрали часть межэтажного свода и, подведя арку под его срез, устроили дополнительную лестницу на двутавровых швеллерах со сваренными перилами. Нижней её опорой стала кирпичная стена в подвале, для чего там также разобрали часть свода [7, с. 109].

После 1954 г. корпус отдали под областную психиатрическую больницу³ [6, с. 113].

Заключение. На основании имеющихся изобразительных источников и визуальных обследований здания можно констатировать следующее:

- уникальность келейного корпуса бывшего бернардинского монастыря в Полоцке заключается в практически полностью сохранившейся его первоначальной келейной планировке со сводчатыми перекрытиями и отсутствием повреждения большинства оконных и дверных проёмов.
- имеющиеся различия современного плана с чертежом 1838 г. могут говорить о возможных перестройках здания, существовавших не повлиявших на его планировку.
- печное отопление келий могло производиться как со стороны коридора, так и из подвала.
- имеющиеся графические материалы, натурные остатки фронтонов и оснований для печных труб позволяют рассмотреть возможность восстановления кровли здания в первоначальном виде с сохранением имеющихся частей фронтонов и выводением кирпичных труб на старых основаниях для использования их каналов в качестве элемента системы вентиляции (возможно восстановить и 1–2 действующих печи).
- выявление характера проведённых перестроек, устройства систем отопления, закладок и растёсок ряда первоначальных проёмов и ниш требует тщательных зондажных и археологических исследований внутри здания для получения информации по каждому помещению. Итоги данных работ должны быть определяющими как для назначения новой функции здания, так и для круга проектных и реставрационно-строительных работ, позволяющих минимизировать или исключить нанесение памятнику ущерба.
- часть выявленных в зондажах и археологических шурфах элементов здания целесообразно музеефицировать с целью демонстрации уникальности данного памятника архитектуры, привлечения туристов, а также в качестве элемента дизайнерского оформления интерьеров помещений.

² Фонды НПИКМЗ, КП 045093 (оригинал) или КВФ 010639 (копия).

³ См. сноску 1, с. 240.

ЛИТЕРАТУРА

1. Боровкова А.А., Коваленко Н.Н., Лившиц Ю.Г. Восстановление монастырского комплекса памятника архитектуры XVIII века // Труды молодых специалистов Полоцкого государственного университета. Строительство. – 2006. – Вып. 22. – С. 3–5.
2. Забытая архитектурно-историческая ценность: монастырь ордена бернардинцев на Полотчине / А.А. Боровкова, Н.Н. Коваленко, А.А. Финогенов и др. // Инновационное развитие Придвинского края: сб. науч. тр. региональной науч.-практ. конф. студентов, магистрантов и аспирантов, Новополоцк, Полоцк, 18–19 дек. 2008 г. / Полоц. гос. ун-т; редкол.: Д.Н. Лазовский и др. – Новополоцк: ПГУ, 2007. – С. 28–32.
3. Настоящее и прошлое костёла святой Анны монастыря бернардинцев в Полоцке / А.А. Боровкова, Н.Н. Коваленко, А.А. Финогенов и др. // Труды молодых специалистов Полоцкого государственного университета. Строительство. – 2007. – Вып. 22. – С. 3–5.
4. Соловьёв А.А. Здание пекарни бернардинского монастыря: натурное обследование // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Стр-во. Прикладные науки. – 2012. – № 16. – С. 19–22.
5. Соловьёв А.А. Полоцкий иезуитский коллегийум в ретроспективе (1581–1914): архитектурно-археологический очерк. – Полоцк: Полоц. кн. изд-во, 2012. – 97 с.
6. Дэйніс І.П. Полацкая даўніна. – Мінск: Медисонт, 2007. – 328 с.
7. Соловьёв А.А. Подвалы главного корпуса монастыря бернардинцев в Полоцке: натурное обследование // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Стр-во. Прикладные науки. – 2021. – № 16. – С. 106–111.
8. Слюнькова И.Н. Храмы и монастыри Беларуси XIX века в составе Российской империи. Пересоздание наследия. – М.: Прогресс-Традиция, 2010. – 616 с.
9. Баравы Р.В., Якімовіч Ю.А. Каштоўны дакумент гісторыі графікі і архітэктуры XVIII ст. // Помнікі культуры. Новыя адкрыцці / Акад. навук БССР, Ін-т мастацтвазнаўства, этнаграфіі і фальклору. – Мінск: Навука і тэхніка, 1985. – С. 113–119.
10. Полоцкое Радование: Свято-Евфросиниевские Торжества 1910 года / ред. А.Г. Борисова-Горюнова. – Полоцк: Свято-Евфросиниевский женский монастырь в г. Полоцке Полоцкой епархии Белорусской Православной Церкви, 2010. – 437 с.
11. Струков Д.М. Альбом рисунков. 1864–1867 гг. / Под науч. ред. О.Д. Баженовой. – Минск: Беларус. энцыкл. імя П. Броўкі, 2011. – 305 с.
12. Делекторский Ф.И. Торжество освящения Полоцкой Иоанно-Богословской двухклассной церковно-приходской – с ремесленным столярно-слесарным отделением – школы // Полоцкие епархиальные ведомости. – 1895. – № 22. – С. 1089–1095.

REFERENCES

1. Borovkova, A.A., Kovalenko, N.N. & Livshits, Yu.G. (2006). Vosstanovlenie monastyr'skogo kompleksa pamyatnika arkhitektury XVIII veka. *Trudy molodykh spetsialistov Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Stroitel'stvo*, (22), 3–5. (In Russ.).
2. Borovkova, A.A., Kovalenko, N.N., Finogenov, A.A., Shirin-Zade, N.F. & Bakatovich, A.A. (2007). Zabytaya arkhitekturno-istoricheskaya tsennost': monastyr' ordena bernardintsev na Polotchine. In D.N. Lazovskii (Eds.) *Innovatsionnoe razvitie Pridvinskogo kraya: sb. nauch. tr. regional'noi nauch.-prakt. konf. studentov, magistrantov i aspirantov, Novopolotsk, Polotsk, 18–19 dek. 2008 g.* (28–32). Novopolotsk: PGU. (In Russ.).
3. Borovkova, A.A., Kovalenko, N.N., Finogenov, A.A. & Shirin-Zade, N.F. (2007). Nastoyashchee i proshloe kostela svyatoi Anny monastyrya bernardintsev v Polotske. *Trudy molodykh spetsialistov Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Stroitel'stvo*, (22), 3–5. (In Russ.).
4. Solov'ev, A.A. (2012). Zdanie pekarni bernardinskogo monastyrya: naturnoe obsledovanie [The cistercian monastery bakehouse: full-sized inspection]. *Vestn. Polots. gos. un-ta. Ser. F, Str-vo. Prikladnye nauki [Herald of Polotsk State University. Series F. Civil Engineering. Applied Sciences]*, (16), 19–22. (In Russ., abstr. in Engl.).
5. Solov'ev, A.A. (2012). *Polotskii iezuitskii kollegium v retrospektive (1581–1914): arkhitekturno-arkheologicheskii ocherk*. Polotsk: Polots. kn. izd-vo. (In Russ.).
6. Deinis, I.P. (2007). *Polatskaya daunina*. Minsk: Medisont. (In Belarus.).
7. Solov'ev, A.A. (2021). Podvaly glavnogo korpusa monastyrya bernardintsev v Polotske: naturnoe obsledovanie [The cellars of the main building of bernardine monastery in Polotsk: full-scale investigation]. *Vestn. Polots. gos. un-ta. Ser. F, Str-vo. Prikladnye nauki [Herald of Polotsk State University. Series F. Civil Engineering. Applied Sciences]*, (16), 106–111. (In Russ., abstr. in Engl.).
8. Slyun'kova, I.N. (2010). Khramy i monastyri Belarusi XIX veka v sostave Rossiiskoi imperii. Peresozdanie naslediya. Moscow: Progress-Traditsiya. (In Russ.).
9. Baravy, R.V. & Yakimovich, Yu.A. (1985). Kashtouny dokument gistoryi grafiki i arkhitektury XVIII st. In *Pomniki kul'tury. Novyya adkrytsi* (113–119). Minsk: Navuka i tekhnika. (In Belarus.).
10. Borisova-Goryunova, A.G. (Eds.) (2010). *Polotskoe Radovanie: Svyato-Evfrosinievskie Torzhestva 1910 goda*. Polotsk: Svyato-Evfrosinievskaia zhenskii monastyr' v g. Polotske Polotskoi eparkhii Belorusskoi Pravoslavnoi Tserkvi. (In Russ.).
11. Strukov, D.M. & Bazhenova, O.D. (Eds.) (2011). *Al'bom risunkov. 1864–1867 gg.* Minsk: Belarus. entsykl. imya P. Brouki. (In Russ.).
12. Delektorskii, F.I. (1895). Torzhestvo osv'yashcheniya Polotskoi Ioanno-Bogoslovskoi dvukhklassnoi tserkovno-prihodskoi – s remeslennym stolyarno-slesarnym otdeleniem – shkoly. *Polotskie eparkhial'nye vedomosti*, (22), 1089–1095. (In Russ.).

Поступила 23.12.2024

POLOTSK BERNARDINE MONASTERY: PREMISES SURVEY OF THE CELL BUILDING**A. SOLOVYOV****(Polotsk National Historical and Cultural Museum-Reserve)**

The article presents the findings of a survey conducted on premises of the cell building of the Polotsk Bernardine Monastery. The premises survey revealed a number of alterations and fillings of the original window and door openings, niches, and vaults, as well as the presence of different layers of paint in the rooms. The preservation of the primary structural elements, including the internal bearing walls and vaults, makes the cell building unique among the Catholic monastic ensembles in Polotsk. The building has architectural and archaeological potential. In conjunction with the ensemble of the Polotsk Jesuit College, it can be considered an encyclopedia of structural solutions employed in monastic construction in Polotsk during the XVIII century.

The results of the cell building survey, when considered alongside the available written and pictorial sources, permit not only the restoration of the original decoration of the building's external facades, but also the interiors of its rooms at various historical periods of the building's existence. The findings of the research should inform the decision-making process regarding the building's new functional purpose and design. Furthermore, they should guide the implementation of building works that not only preserve the monument but also museumise its architectural and interior elements.

Keywords: Bernardine Monastery, cell building, attic, field surveys, plans and sections.

УДК 699.8

DOI 10.52928/2070-1683-2025-40-1-40-45

**ВИЗУАЛЬНЫЙ ОСМОТР СОСТОЯНИЯ ОТМОСТКИ КЛЁПАНОГО
ВЕРТИКАЛЬНОГО РЕЗЕРВУАРА ДЛЯ ХРАНЕНИЯ НЕФТЕПРОДУКТОВ****А.Д. СТРОГАНОВА***(Белорусский национальный технический университет, Минск)*ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5477-2938>

ad.rusanova@mail.ru

Проведен краткий анализ требований нормативной литературы начала XX века по проектированию вертикальных стальных резервуаров. Приводятся технические характеристики резервуара вертикального стального клёпаного, построенного в 1934 году на юге Республики Беларусь, предназначенного для хранения дизельного топлива. В статье содержатся изображения, приводимые для иллюстрации текущего состояния укрепленной булыжником отмостки исследуемого резервуара. В результате проведенного визуального осмотра были выявлены поверхностные дефекты бетонного покрытия укрепленной отмостки резервуара, а также некоторые несоответствия требованиям действующей нормативной документации. Дается заключение об актуальности проведения исследования возможности применения технологий устройства отмосток, разработанных в начале XX века, с использованием современных строительных материалов при одновременном соответствии требованиям современной нормативной документации.

Ключевые слова: клёпанный резервуар, отмостка, дефекты, нефтепродукт, строительство.

Введение. Период индустриализации СССР 1929–1941 гг. заключался в выполнении плана первых пятилеток и ознаменовался интенсивными темпами развития промышленности с целью сокращения экономического отставания от стран капиталистического Запада и наращивания обороноспособности страны [1]. В частности, в Белорусской ССР велась техническая реконструкция и расширение старых заводов, например, Минского станко-строительного завода им. Ворошилова. Также осуществлялось строительство новых предприятий, таких как торфо-завод «Красное знамя», Могилёвский авторемонтный завод и Быховский ацетоновый – в БССР начинают развиваться топливная, машиностроительная и химическая отрасли [2, с. 147].

Высокие темпы развития индустрии привели к увеличению удельного веса промышленной продукции в общем объеме валовой продукции промышленности и сельского хозяйства БССР [3] и, как следствие, к приобретению широкой известности. Так, различные станки, изготовленные на предприятиях тяжелой промышленности БССР, отправлялись в другие города СССР, а Кричевский цемент использовался почти на всех стройках и реконструкциях страны.

Вышесказанное создает необходимую основу для формирования долгосрочных логистических цепочек, чтобы перемещать продукцию от изготовителя к потребителю. В ключевых узлах транспортных путей создаются хранилища – нефтебазы – для обеспечения бесперебойного снабжения авиационного, автомобильного и речного транспорта авиационным, дизельным и судовым топливом.

В зависимости от региона БССР строились нефтебазы с различной номенклатурой резервуарных парков на основании потребности в том или ином виде нефтепродукта. Но наибольшее распространение получили резервуары типа РВС для хранения дизельного топлива.

Не смотря на отмечаемую на сегодняшний день тенденцию к перевооружению нефтебаз и резервуарных парков более прогрессивными конструкциями и технологиями сооружения резервуаров, можно наблюдать некоторые объекты нефтегазовой отрасли, для которых предпочтительнее продлить срок эксплуатации имеющихся резервуаров. Способствовать этому может проведение определенных мероприятий, таких как текущие и плановые ремонты, реконструкции и модернизации, не снижающие конструкционную прочность объектов, построенных в начале прошлого столетия. Начальным этапом увеличения срока эксплуатации таких объектов является проведение технического диагностирования состояния конструкции резервуара, его элементов и материала. Простейшим методом неразрушающего контроля оптического вида является визуальный.

Уточним, что одним из слабых мест конструкции резервуара является так называемый уторный узел. Увеличение возникающих напряжений металла в области сопряжения первого пояса и днища и, как следствие, возможное превышение ими предельно-допустимых значений может стать причиной порыва и выхода хранимого продукта. Описываемая ситуация возможна по причине крена резервуара, что, в свою очередь, объясняется неравномерной осадкой грунтов основания в результате попадания в них атмосферных осадков. Ввиду этого становится актуальной задача поддержания такого элемента конструкции резервуара, как отмостка, в состоянии, способном защитить от длительного воздействия воды уторный узел и грунты основания.

Таким образом, необходимо выполнить следующие задачи:

- изучить требования нормативной документации времен постройки рассматриваемого резервуара и современной;
- провести визуальный осмотр отмостки резервуара;
- дать заключение о возможности приведения состояния отмостки в соответствие требованиям действующей документации.

Объект изучения. В 1932 г. был утвержден первый стандарт (ОСТ 5125) на стальные клёпаные вертикальные резервуары вместимостью до 10560 м³. Этот ОСТ положил начало стандартизации в нефтяном резервуаростроении и действовал до 1944 г. [4], в котором был разработан и введен в действие первый государственный стандарт на сварные резервуары ГОСТ 2486-44. Действие ГОСТ 2486-44 было отменено в 1952 году, а резервуары начали строиться по разрабатываемым типовым чертежам¹.

Рассматриваемый резервуар вертикальный клёпанный (РВК)² был изготовлен полистовым способом с соединением швов методом клёпки (рисунок 1) на нефтебазе, расположенной на юге БССР, в 1934 году и предназначался для хранения дизельного топлива.

В связи с нестабильной ситуацией, сложившейся на текущий момент за пределами Республики Беларусь, нефтебаза, о которой идет речь в данной статье, была временно выведена из эксплуатации.



а



б

а – общий вид; б – клёпаная стенка

Рисунок 1. – РВК-1000

Данный резервуар имеет характеристики, представленные в таблице 1.

Таблица 1. – Основные характеристики РВК-1000

Наименование	Ед. изм.	Показатель
Внутренний диаметр по нижнему поясу	мм	9813
Высота резервуара от дна до верхней полки обвязочного уголка	мм	9530
Высота уровня мёртвого остатка	мм	150
Предельная высота залива с учетом теплового расширения продукта	мм	9054
Площадь дна	м ²	75,639
Полная ёмкость цилиндрической части	м ³	718,860
Полезная ёмкость резервуара (при предельной высоте налива)	м ³	682,912

Стенка резервуара полистового изготовления выполнена из листов, имеющих размеры, представленные в таблице 2, и складывающихся в семь поясов, расположенных ступенчато (рисунок 2). Согласно [5, с. 96], указанная схема расположения поясов была принята для вертикальных резервуаров с одинаковой толщиной стенки в виду того, что при этом получается минимальное количество шаблонов листов стенок, а это значительно удешевляет разметку.

Днище выполнено из листов толщиной 7 мм и окрасок 8 мм. Толщина листов настила – 3 мм. Характеристика соединений корпуса резервуара представлена в таблице 3.

¹ Щурова, Е.В. Развитие и совершенствование конструктивных и технико-технологических решений по обеспечению герметичности стальных вертикальных резервуаров: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 5.6.6 / Щурова Елена Владимировна. – Уфа, 2022. – 24 с.

² Правила и инструкции по технической эксплуатации металлических резервуаров и очистных сооружений: утверждены Госкомнефтепродуктом СССР от 26.12.86. – М.: Недра, 1977. – 464 с. (См. с. 6).

Таблица 2. – Размеры листов поясов резервуара

Номер пояса	Размер, мм	Толщина, мм
I	4130×1400	7
II	4130×1400	6
III	4130×1400	6
IV	4130×1400	6
V	4130×1390	6
VI	4130×1390	6
VII	4130×1390	6

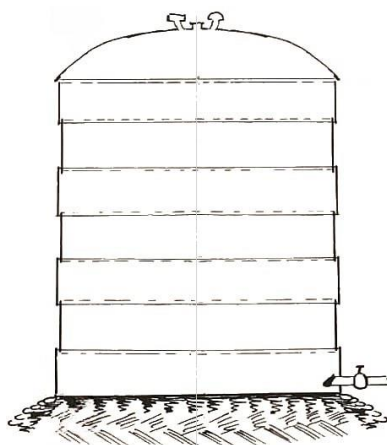


Рисунок 2. – Схема ступенчатого расположения поясов

Таблица 3. – Характеристика соединений резервуара

Наименование соединения	Описание шва	Исполнение	Перекрытие, мм	Диаметр заклепок, d, мм
Горизонтальные швы корпуса	клёпаный однорядный	внахлестку	45	12
Вертикальные швы I и II поясов	клёпаный четырёхрядный	впритык двумя неравными накладками	-	12
Вертикальные швы III–VII пояса	клёпаный двухрядный	внахлестку	54	12
Настил покрытия	клёпаный однорядный	внахлестку	30	10
Присоединение I пояса к днищу	клёпаный однорядный	внахлестку	45	12

Сопряжение стенки с днищем и крышей произведено с помощью нижнего и верхнего кольца, выполненного из углового металла с размерами 75×8 мм и 50×5 мм соответственно. Нижний кольцевой угольник расположен с внутренней стороны резервуара, верхний – с наружной.

На резервуаре располагается сферическая крыша. Для подъема на резервуар установлена шахтная лестница, также имеется площадка обслуживания оборудования на крыше.

Данных о грунтах основания, марке стали, конструкции фундамента и изоляции днища нет. Однако известен факт того, что в 1951 году был проведен ремонт резервуара, в ходе которого отмостка была укреплена булыжником. Схематичное изображение разреза основания рассматриваемого резервуара приведено на рисунке 3.

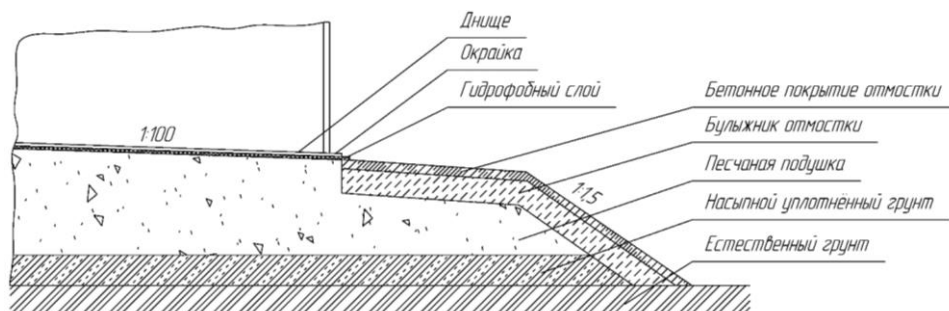


Рисунок 3. – Схема устройства основания резервуара РВК-1000

Осмотр отмостки. Отмостка предназначена для защиты песчаной подушки и фундамента резервуара от атмосферных осадков путем их отвода в сторону сборных коллекторов. Отмостка состоит из горизонтальной и наклонной части с необходимым уклоном для отвода воды^{3,4}.

Согласно требованиям 1958 г.⁵, для резервуаров ёмкостью от 700 м³ и более бермы и откосы основания должны моститься камнем. При макропористых грунтах основания откосы резервуара должны моститься камнем по гидроизоляционному слою с покрытием отмостки слоем асфальта или бетона.

Технический кодекс установившейся практики Республики Беларусь ТКП 169/ОР (02300) устанавливает требования к проведению профилактического осмотра с необходимостью проверки: отмостка вокруг резервуара должна иметь необходимый уклон, обеспечивающий отвод воды с ее поверхности; дефекты в виде трещин, повреждений должны быть исправлены; не допускается наличие растительности и скопление воды и снега у контура резервуара⁶.

Визуальный контроль элементов сооружений проводится с целью выявления изменения их форм и поверхностных дефектов в условиях достаточной освещенности невооруженным глазом или с применением необходимых приборов и инструментов.

Осмотр отмостки резервуара РВК-1000 проводился в дневное время суток с применением в качестве инструментов металлической линейки, рулетки, увеличительного стекла (увеличение до $\times 10$) и металлического щупа.

Ввиду того, что нарушения сплошности бетонного покрытия отмостки рассматриваемого резервуара отмечено не было, для иллюстрации укрепления булыжником откосов песчаной подушки резервуара на рисунке 4 представлен дефект в виде скола созданной по аналогичной технологии отмостки резервуара вертикального стального объёмом 1000 м³, выполненного полистовым методом с соединением листов сварочными швами РВС-1000 в 1954 г.

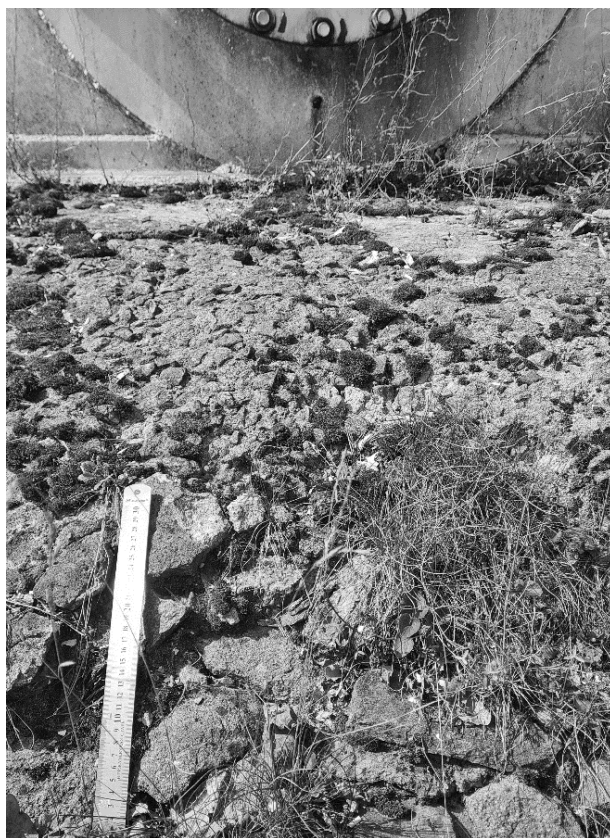


Рисунок 4. – Дефект отмостки РВС-1000

Целью осмотра отмостки резервуара РВК-1000 являлось выявление поверхностных дефектов, образовавшихся в процессе эксплуатации или ремонта обследуемого резервуара. На рисунке 5 представлен характерный вид текущего состояния отмостки исследуемого резервуара.

³ ТКП 169/ОР (02300). Правила технической эксплуатации резервуаров для нефти и нефтепродуктов. – Введ. 01.03.2019. – Минск: МЧС, 2019. – 128 с.

⁴ ГОСТ 31385-2016. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия. – Введ. 01.03.2017. – М.: Стандартинформ, 2016. – 98 с.

⁵ СН 26-58 Технические условия изготовления и монтажа стальных цилиндрических вертикальных резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов. – Введ. 01.10.1958. – М.: Госстройиздат, 1958. – 50 с. (См. с. 9).

⁶ См. сноску 3.

В результате проведенного осмотра было выявлено несколько дефектов бетонного покрытия отмостки (рисунок 5):

- гравелистая поверхность, появление которой возможно из-за недостаточного уплотнения бетонной смеси;
- поверхностные раковины, к одной из причин появления которых можно отнести скопления воздуха в бетонной смеси;

- эрозия бетона как следствие погодных условий.

Особо следует отметить, что трещин выявлено не было.



Рисунок 5. – Текущее состояние отмостки РВК-1000

Немаловажным моментом является выявленное нарушение сплошности гидрофобного слоя в зоне узла сопряжения нижнего пояса и днища.

Также при осмотре было выявлено наличие растительности на отмостке резервуара, что для объекта, находящегося в эксплуатации, квалифицировалось бы как несоответствие требованиям нормативной документации. Указанные выше дефекты и несоответствие требованиям могут послужить причиной проведения текущего ремонта резервуара, который, согласно⁷, может включать в себя такой вид работ, как ремонт отмостки вокруг резервуара с восстановлением до 100% общей площади отмостки.

Заключение. На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что в настоящее время на территории Республики Беларусь существуют объекты, техническое состояние которых позволяет проводить их дальнейшую эксплуатацию в будущем при возникновении такой необходимости. Однако это становится возможным только при проведении полной технической диагностики стальных конструкций резервуара, установленного оборудования и запорной арматуры, а также подводящих трубопроводов.

Дополнительно можно отметить факт того, что созданный в начале 30-х годов XX века запас прочности отмостки исследуемого резервуара не был исчерпан за прошедшие 90 лет с момента его постройки. На основании результатов проведенного визуального осмотра можно заключить, что отмостка резервуара находится в удовлетворительном состоянии.

Таким образом, становится актуальной задача исследования возможности применения опыта в области устройства отмостки начала XX века с использованием современных строительных материалов и одновременным соответствием требованиям действующей нормативной документации для увеличения межремонтного периода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лельчук В.С. Индустриализация СССР в годы второй пятилетки (1933–1937 гг.) // Вопросы истории. – 1973. – № 3. – С. 3–22.
2. Гісторыя Беларусі: курс лекцый / А.Ц. Арбузаў, А.І. Багдановіч, А.Г. Багдановіч і інш. – Мінск: БНТУ, 2009. – 220 с. – URL: <https://rep.bntu.by/handle/data/2553> (дата звароту 31.08.2024).
3. Чигринов П.Г. История Белоруссии с древности до наших дней: учебное пособие. – Минск: Книжный дом, 2004. – 672 с.
4. Бобрицкий Н.В., Юфин В.А. Основы нефтяной и газовой промышленности: учебник. – М.: Недра, 1988. – 199 с.
5. Кандеев В.И., Котляр Е.Ф. Стальные резервуары / Под ред. В.Г. Шухова. – М., Ленинград: Госмашметиздат, 1934. – 364 с.

⁷См. сноску 3.

REFERENCES

1. Lel'chuk, V.S. (1973). Industrializatsiya SSSR v gody vtoroi pyatiletki (1933–1937 gg.). *Voprosy istorii*, (3), 3–22. (In Russ.).
2. Arbuzau, A.T., Bagdanovich, A.I., Bagdanovich, A.G., Balandzin, K.I., Bratachkin, A.V., Byalyaeu, A.V. ... Yakubinskaya, A.D. (2009). *Gistoryya Belarusi: kurs lektsyi*. Minsk: BNTU. (In Belarus.). URL: <https://rep.bntu.by/handle/data/2553>.
3. Chigrinov, P.G. (2004). *Istoriya Belorussii s drevnosti do nashikh dnei: uchebnoe posobie*. Minsk: Knizhnyi dom. (In Russ.).
4. Bobritskii, N.V. & Yufin, V.A. (1988). *Osnovy neftyanoi i gazovoi promyshlennosti: uchebnik*. Moscow: Nedra. (In Russ.).
5. Kandeev, V.I., Kotlyar, E.F. & Shukhov, V.G. (Eds.) (1934). *Stal'nye rezervuary*. Moscow, Leningrad: Gosmashmetizdat. (In Russ.).

Поступила 02.12.2024

**VISUAL INSPECTION OF THE BLIND AREA OF A RIVETED VERTICAL TANK
FOR STORING PETROLEUM PRODUCTS**

A. STROGANOVA

(Belarusian National Technical University, Minsk)

A brief analysis of the requirements of the regulatory literature of the early 20th century on the design of vertical steel tanks is carried out. The technical characteristics of a vertical riveted steel tank, built in 1934 in the south of the Republic of Belarus, intended for storage of diesel fuel, are given. The article contains images provided to illustrate the current state of the cobblestone-reinforced blind area of the reservoir under study. As a result of the visual inspection surface defects of the concrete coating of the reinforced blind area of the tank were revealed, as well as some inconsistencies with the requirements of the current regulatory documentation. The conclusion is given about the relevance of conducting a study of the possibility of using blind area device technologies developed at the beginning of the XX century using modern building materials while meeting the requirements of modern regulatory documentation.

Keywords: riveted tank, blind area, defects, petroleum product, construction.

ГЕОДЕЗИЯ

УДК 528.236

DOI 10.52928/2070-1683-2025-40-1-46-50

МАТРИЧНОЕ ОБОБЩЕНИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ТОПОЦЕНТРИЧЕСКИХ КООРДИНАТ

канд. техн. наук, доц. А.М. ДЕГТЯРЁВ, П.Ф. ПАРАДНЯ
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

В статье представлена возможность обобщения преобразований разного рода топоцентрических координат с использованием матричной формы, что делает сами процедуры преобразования более понятными, компактными и обратимыми с наименьшими вычислительными и теоретическими затратами.

Ключевые слова: системы координат, декартовы топоцентрические координаты, декартовы геоцентрические координаты, полярные топоцентрические координаты, преобразования координат, матричное представление преобразований.

Введение. Топоцентрические координаты играют важную роль в геодезии, астрономии, спутниковых измерениях [1; 2]. Их используют при проведении точных измерений и построении карт местности. Они позволяют определить положение объекта относительно конкретной точки наблюдения на поверхности Земли. Это важно для создания топографических и кадастровых карт. В астрономии топоцентрические координаты применяются для определения положения небесных объектов с точки, находящейся на поверхности Земли. Это особенно значимо при наблюдении звёзд, планет и спутников. При работе со спутниковыми системами (GPS, ГЛОНАСС и т.п.) топоцентрические координаты используются для точного определения положения спутников на орбите относительно наземного наблюдателя, что позволяет корректно интерпретировать данные спутниковых измерений и использовать их для различных приложений.

Топоцентрические координаты находят применение в работе оптических и радиолокационных систем, используемых для наблюдения и измерения различных объектов, таких как самолеты, корабли и даже астрономические объекты. Поскольку топоцентрические координаты (азимут, зенитное расстояние, высота) используются в системах координат для описания положения объектов в пространстве относительно точки наблюдения, то это помогает в решении задач, связанных с ориентацией и навигацией. Эти координаты позволяют более точно и детально представлять и анализировать пространственные данные, что делает их незаменимыми в геодезических и астрономических приложениях.

Основная часть. Рассмотрим подробнее виды и структуру топоцентрических координат. В этой системе начало координат находится в некоторой точке $Q_0 (B_0, L_0, H_0)$, расположенной обычно на земной поверхности. В зависимости от того, что принято за поверхность относимости, выделяют *горизонтную* и *экваториальную* систему. В экваториальной за плоскость относимости принимается плоскость, параллельная экватору, а в горизонтной – плоскость, перпендикулярная отвесной линии, тогда система *астрономическая*, или перпендикулярная нормали к поверхности в точке – система *геодезическая*, задающая геодезический горизонт. Вторая система получила в геодезии наибольшее распространение. Топоцентрические геодезические горизонтные системы в свою очередь делят на ряд систем:

– декартовы прямоугольные топоцентрические координаты: ось z расположена на продолжении нормали к поверхности эллипсоида в точке Q_0 , ось x расположена в плоскости меридиана точки Q_0 перпендикулярно к оси z и направлена в сторону оси вращения эллипсоида, ось y перпендикулярна к осям x и z и направлена в сторону увеличения долготы;

– полярные топоцентрические координаты: геодезический азимут A_0 – двугранный угол между плоскостью меридиана начальной точки и нормальной плоскостью, проходящей через нормаль в точке Q_0 и заданную точку Q пространства, зенитное расстояние Z_0 – угол между осью z и прямолинейным направлением из точки Q_0 в точку Q , расстояние D между точками Q_0 и Q по прямой (рисунок 1).

Из рисунка 1 связь между двумя системами топоцентрических координат представим следующими формулами:

$$\begin{cases} x = D \cdot \sin(Z_0) \cdot \cos(A_0); \\ y = D \cdot \sin(Z_0) \cdot \sin(A_0); \\ z = D \cdot \cos(Z_0). \end{cases} \quad (1)$$

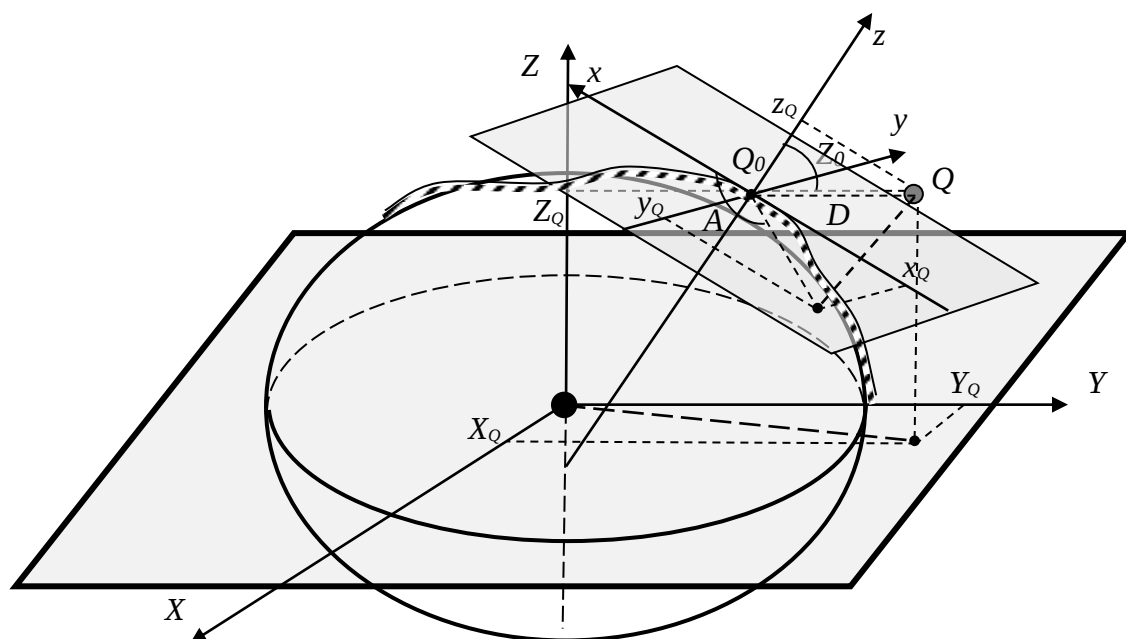


Рисунок 1. – Виды топоцентрических координат на поверхности Земли

В формулах (1) величины

$$c = \begin{cases} l = \sin(Z_0) \cdot \cos(A_0); \\ m = \sin(Z_0) \cdot \sin(A_0); \\ n = \cos(Z_0) \end{cases}$$

являются направляющими косинусами. Тогда (1) можно переписать как

$$\begin{cases} x = D \cdot l; \\ y = D \cdot m; \\ z = D \cdot n. \end{cases} \quad (1a)$$

Обратный переход будет иметь вид [4]:

$$\begin{cases} \tan(A_0) = \frac{y}{x}; \\ \cotan(Z_0) = \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}} = \frac{z}{x \cdot \cos(A_0) + y \cdot \sin(A_0)}; \\ D = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = (x \cdot \cos(A_0) + y \cdot \sin(A_0) \cdot \sin(Z_0) + z \cdot \cos(Z_0)), \end{cases} \quad (2)$$

а согласно (1a), выражение (2) через направляющие косинусы формулы примет вид:

$$\begin{cases} \tan(A_0) = \frac{m}{l}; \\ \cotan(Z_0) = \frac{n}{\sqrt{l^2 + m^2}}; \\ D = D \cdot \sqrt{l^2 + m^2 + n^2}. \end{cases}$$

Связь между декартовыми топоцентрическими и декартовыми геоцентрическими координатами, отнесёнными к определённому эллипсоиду, установим следующим образом [3].

Шаг 1. Перенесем начало координат топоцентрической системы в точку n_0 (см. рисунок 1), в результате чего координата z увеличится на величину $N_0 + H_0$.

Шаг 2. Повернем оси координат x и z вокруг оси y на угол $(90^\circ - B_0)$, чтобы ось z совпала с осью вращения эллипсоида.

Шаг 3. Перенесем начало координат n_0 в центр эллипсоида O на расстояние $On_0 = e^2 \cdot N_0 \cdot \sin(B_0)$.

Шаг 4. Оси координат, лежащие в плоскости экватора, повернем вокруг оси Z на угол, равный долготе L_0 начальной точки Q_0 , а у абсциссы изменим знак на обратный.

В результате преобразований получим формулы в алгебраическом развёрнутом виде [3]:

$$\begin{cases} X = [(z + N_0 + H_0) \cdot \cos(B_0) - x \cdot \sin(B_0)] \cdot \cos(L_0) - y \cdot \sin(L_0); \\ Y = [(z + N_0 + H_0) \cdot \cos(B_0) - x \cdot \sin(B_0)] \cdot \sin(L_0) + y \cdot \cos(L_0); \\ Z = (z + N_0 + H_0) \cdot \sin(B_0) + x \cdot \cos(B_0) - e^2 N_0 \cdot \sin(B_0). \end{cases} \quad (3)$$

Формулы (3) удобны для прямых вычислений, но очень неудобны, когда требуется вычислить тройку других величин, например, координаты (x, y, z) , для решения обратной задачи. Для упрощения этого процесса представим уравнения (3) в матричном виде согласно описанным шагам:

– введем матрицы вращения для шага 2:

$$R_y(90^\circ - B_0) = \begin{bmatrix} -\sin(B_0) & 0 & \cos(B_0) \\ 0 & 1 & 0 \\ \cos(B_0) & 0 & \sin(B_0) \end{bmatrix} \quad (4)$$

и для шага 4:

$$R_z(L_0) = \begin{bmatrix} \cos(L_0) & -\sin(L_0) & 0 \\ \sin(L_0) & 0 & \cos(L_0) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (5)$$

– учтем сдвиги в преобразовании на шаге 1 и 4 и окончательно получим:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_z(L_0) \cdot R_y(90^\circ - B_0) \cdot \left(\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ N_0 + H_0 \end{bmatrix} \right) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ e^2 \cdot N_0 \cdot \sin(B_0) \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Перепишем выражение (6), используя соответствующие обозначения:

$$K_d = E_1 \cdot (R \cdot (K_t + A_1) - A_2). \quad (6a)$$

Здесь E_1 матрица вида

$$E_1 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

а матрица вращения R

$$R = R_z(L_0) \cdot R_y(90^\circ - B_0) = \begin{pmatrix} \cos(L_0) \sin(B_0) & \sin(L_0) & -\cos(B_0) \cos(L_0) \\ -\sin(B_0) \sin(L_0) & \cos(L_0) & \cos(B_0) \sin(L_0) \\ \cos(B_0) & 0 & \sin(B_0) \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Теперь из свёрнутого вида (6a) легко получить в матричном виде обратное преобразование декартовых геоцентрических прямоугольных координат K_d в топоцентрические прямоугольные координаты K_t в виде простой формулы

$$K_t = R^T \cdot (E_1^{-1} \cdot K_d + A_2) - A_1. \quad (8)$$

Можно учесть, что $E_1^{-1} = E_1$. Ортогональная матрица вращения R равна своей транспонированной, т.е. $R^{-1} = R^T$.

Если есть необходимость, например, для анализа, матричный вид (8) можно записать в алгебраическом, развёрнутом виде, произведя соответствующие матричные операции. Тогда имеем

$$\begin{cases} x = (Z + e^2 N_0 \cdot \sin(B_0)) \cdot \cos(B_0) - (X \cdot \cos(L_0) + Y \cdot \sin(L_0)) \cdot \sin(B_0); \\ y = Y \cdot \cos(L_0) - X \cdot \sin(L_0); \\ z = (Z + e^2 N_0 \cdot \sin(B_0)) \cdot \sin(B_0) + (X \cdot \cos(L_0) + Y \cdot \sin(L_0)) \cdot \cos(B_0) - (N_0 + H_0). \end{cases} \quad (9)$$

Если заданы декартовы геоцентрические координаты центра топоцентрической системы $(x_0, y_0, z_0) = K_{0d}$, (алгебраический вид см. [3]), то формула (8) примет весьма простой и компактный вид

$$K_t = R^T \cdot E_1^{-1} \cdot (K_d - K_{0d}), \quad (10)$$

а обратная ей формула (6)

$$K_d = E_1 \cdot (R \cdot K_t + K_{0d}). \quad (11)$$

Если заданы топоцентрические полярные координаты (A_{12}, z_{12}, s_{12}) или топоцентрические горизонтные прямоугольные координаты (x_2, y_2, z_2) , то можно найти разность геоцентрических прямоугольных декартовых экваториальных координат между точками 1 и 2 $(\Delta X_{12}, \Delta Y_{12}, \Delta Z_{12})$, используя матрицу преобразования $A = R \cdot E_1$ как

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X_{12} \\ \Delta Y_{12} \\ \Delta Z_{12} \end{bmatrix} = A \cdot \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = A \cdot s_{12} \cdot \begin{bmatrix} \sin(z_{12}) \cdot \cos(A_{12}) \\ \sin(z_{12}) \cdot \sin(A_{12}) \\ \cos(z_{12}) \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Теперь, зная пространственные прямоугольные экваториальные геоцентрические координаты первой точки, имея приращения координат, легко вычислить пространственные прямоугольные экваториальные геоцентрические координаты второй точки.

При обратном преобразовании, когда известны разности прямоугольных геоцентрических координат, полярные или топоцентрические горизонтные координаты легко вычисляются из предыдущей формулы как

$$K_t = \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = s_{12} \cdot \begin{bmatrix} \sin(z_{12}) \cdot \cos(A_{12}) \\ \sin(z_{12}) \cdot \sin(A_{12}) \\ \cos(z_{12}) \end{bmatrix} = A^T \cdot \begin{bmatrix} \Delta X_{12} \\ \Delta Y_{12} \\ \Delta Z_{12} \end{bmatrix}. \quad (13)$$

В геодезической литературе (см. [1]) часто горизонтные топоцентрические координаты обозначают как ENU (East-North-Up).

Используя совместно (7), (8) и (13), имеем общий матричный набор формул, позволяющий быстро решить как прямые, так и обратные задачи преобразования топоцентрических координат в виде

$$K_t = R^T \cdot (E_1^{-1} \cdot K_d + \Delta_2) - \Delta_1 = s_{12} \cdot \begin{bmatrix} l \\ m \\ n \end{bmatrix}_p = A^T \cdot \begin{bmatrix} \Delta X_{12} \\ \Delta Y_{12} \\ \Delta Z_{12} \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Заключение. Полученные формулы (10) и (11) намного удобнее для практического использования, чем их алгебраический аналог [3], так как легко позволяют решать все обратные задачи, т.е. при необходимости определить координаты K_d , K_t или координаты центра K_{0d} без трудоемкого процесса решения системы нелинейных уравнений.

На основании формулы (14) находятся все требуемые формулы связи между геоцентрическими прямоугольными, топоцентрическими горизонтными и полярными координатами с минимальными вычислительными затратами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии: монография: в 2 т. – М.: ФГУП «Картгеоцентр», 2005. – Т. 1. – 334 с.
2. Бойко Е.Г. Высшая геодезия. Часть 2. Сферондическая геодезия: учебник для вузов. – М.: Картгеоцентр-Геодезиздат, 2003. – 144 с.
3. Машимов М.М. Геодезия. Теоретическая геодезия: справочное пособие / Под ред. В.П. Савиных, В.Р. Ященко. – М.: Недра, 1991. – 268 с.
4. Морозов В.П. Курс сферондической геодезии. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Недра, 1979. – 296 с.

REFERENCES

1. Antonovich, K.M. (2005). *Ispol'zovanie sputnikovykh radionavigatsionnykh sistem v geodezii: monografiya: v 2 t. T. 1.* Moscow: FGUP «Kartgeotsentr». (In Russ.).
2. Boiko, E.G. (2003). *Vyshshaya geodeziya. Chast' 2. Sferoidicheskaya geodeziya: uchebnik dlya vuzov.* Moscow: Kartgeotsentr-Geodezizdat. (In Russ.).
3. Mashimov, M.M., Savinykh, V.P. (Eds.) & Yashchenko, V.R. (Eds.) (1991). *Geodeziya. Teoreticheskaya geodeziya: spravocnoe posobie.* Moscow: Nedra. (In Russ.).
4. Morozov, V.P. (1979). *Kurs sferoidicheskoi geodezii. Izd. 2-e, pererab. i dop.* Moscow: Nedra. (In Russ.).

Поступила 18.02.2025

MATRIX GENERALIZATION OF TOPOCENTRIC COORDINATE TRANSFORMATIONS

A. DEGTJAREV, P. PARADNYA
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

The article presents the possibility of generalizing the transformations of various types of topocentric coordinates using a matrix form, which makes the transformation procedures themselves more understandable, compact and reversible with the least computational and theoretical costs.

Keywords: *coordinate systems, cartesian topocentric coordinates, cartesian geocentric coordinates, polar topocentric coordinates, coordinate transformations, matrix representation of transformations.*

ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 621.643.8

DOI 10.52928/2070-1683-2025-40-1-51-57

ОЦЕНКА ВЕЛИЧИНЫ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ, ПОСТУПИВШИХ
В РЕЗУЛЬТАТЕ АВАРИЙНЫХ УТЕЧЕК В ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

д-р техн. наук В.П. ИВАНОВ¹⁾, канд. техн. наук И.А. ЛЕОНОВИЧ²⁾,
канд. техн. наук А.Г. КУЛЬБЕЙ³⁾, В.В. БЕРДАШКЕВИЧ⁴⁾

(¹⁾, ³⁾, ⁴⁾ Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой,

²⁾ РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва)

В статье представлен анализ аварийных утечек дизельного топлива и их воздействия на окружающую среду. Описаны примеры аварийных ситуаций, по которым проведены расчеты времени вытекания топлива через технологические отверстия из емкостей хранения. Акцент сделан на оценке экологических рисков, связанных с загрязнением почвы и водоемов, а также на мерах по предотвращению утечек. Статья подчеркивает важность своевременного обнаружения и ликвидации утечек, а также разработки эффективных мер по их предупреждению для повышения экологической безопасности на объектах хранения нефтепродуктов.

Ключевые слова: окружающая среда, аварийная утечка, загрязнение почвы, мониторинг утечек, экологическая безопасность.

Введение. В последние годы вопросы экологической безопасности на промышленных предприятиях становятся все более актуальными. Утечки жидкостей, в частности, дизельного топлива, могут привести не только к экологическим проблемам, но также к значительным экономическим потерям, нарушениям технологических процессов, а иногда они приводят к авариям с взрывами и пожарами. Для оценки масштабов развивающихся событий важно проводить системные исследования и расчеты, позволяющие определить потенциальные объемы утечек и их временные характеристики.

В последнее время аварийные утечки топлива на промышленных объектах неоднократно приводили к значительным экологическим последствиям. Одним из примеров стала утечка мазута на Пинской мини-ТЭЦ в 2014 году¹. Площадь разлива составила около 1500 м², что потребовало длительного времени на ликвидацию последствий. Причиной аварии стала трещина в задвижке трубопровода диаметром 10 см, через которую мазут закачивался в резервуар. Несмотря на оперативное устранение течи, для полной ликвидации последствий потребовалось несколько дней. Специалисты отметили, что благодаря промерзшей почве серьезной экологической угрозы удалось избежать, однако сама авария привлекла внимание к проблеме старения инфраструктуры и недооценки возможных последствий.

Аналогичные случаи часто фиксируются на других предприятиях. В г. Норильск 29 мая 2020 года на ТЭЦ-3 произошла разгерметизация резервуара с дизельным топливом, и в поселке Новая Кежда 10 октября 2020 года сложилась такая же ситуация². Эти примеры подчеркивают необходимость разработки более эффективных методов ликвидации аварийных разливов для предотвращения экологических катастроф.

Актуальность работы обусловлена необходимостью разработки нормативных документов по оценке утечек горюче-смазочных материалов на предприятиях, что позволит более эффективно планировать мероприятия по их предотвращению и обеспечению экологической безопасности.

Целью исследования является оценка количества загрязняющих веществ, поступающих в окружающую среду в результате аварийных утечек из емкостей хранения. Рассмотрим два случая утечек дизельного топлива на промышленном предприятии с акцентом на их экологические последствия, а для этого произведем установление массы утечки при разных временных интервалах. Особенностью расчетов является тот факт, что размеры отверстий, через которые происходили утечки, заранее не были известны.

Для достижения поставленной цели были использованы методы гидравлических расчетов, основанные на классических уравнениях для течений жидкости в условиях невысоких перепадов давления.

Эффективная система предотвращения утечек включает в себя [1; 2]:

1) своевременное выявление повреждений и отклонений в работе систем хранения, позволяющее предотвратить аварии на ранних стадиях;

¹ Утечка мазута на мини-ТЭЦ в Пинске: площадь разлива – около 1,5 тысяч квадратных метров. 2014. URL: <https://ctv.by/news/proisshestviya/utechka-mazuta-na-mini-tec-v-pinske-ploshad-razliva-okolo-15-tysyach-kvadratnyh-metrov>.

² Разливы нефтепродуктов в России за 2020 год. 2020. URL: <https://terra-ecology.ru/stati/razlivy-nefteproduktov-v-rossii-za-2020-god>.

2) автоматизированные системы, реагирующие на резкие изменения давления или уровня жидкости, которые могут оперативно перекрыть подачу топлива и минимизировать утечки;

3) регулярные проверки оборудования на предмет коррозии, износа и механических повреждений, чтобы снизить вероятность аварийных ситуаций.

Аварийные утечки дизельного топлива представляют собой серьезную угрозу для окружающей среды. Попадая в почву и водоемы, дизельное топливо может распространяться на большие расстояния, проникая в грунтовые воды и загрязняя экосистемы. Основные экологические риски включают следующее [3]:

1) дизельное топливо может накапливаться на поверхности воды, создавая пленку, которая препятствует газообмену и приводит к гибели водной фауны и флоры. Кроме того, нефтепродукты могут проникать в грунтовые воды, делая их непригодными для питья и сельскохозяйственных нужд;

2) при попадании в почву дизельное топливо снижает ее плодородие, нарушая естественный баланс микроорганизмов и изменяя химический состав. Это особенно опасно в районах, где ведется сельское хозяйство, так как загрязненные земли могут терять свои производственные качества;

3) дизельное топливо содержит ряд токсичных соединений, которые могут накапливаться в организме животных и растений, вызывая хронические отравления и нарушения в экосистемах.

Своевременное обнаружение и ликвидация утечек позволяют минимизировать экологический ущерб. Однако в условиях недостаточного контроля и мониторинга аварии могут достигать масштабов экологических катастроф.

Основная часть. Безопасность эксплуатации трубопроводных систем является одним из ключевых аспектов современного промышленного транспорта. Любые утечки топлива, особенно в крупных масштабах, могут повлечь за собой серьезные последствия для окружающей среды.

Аварийные утечки дизельного топлива из резервуаров могут быть вызваны различными факторами:

- механическим повреждением (в том числе диверсионными действиями);
- эрозийным износом оборудования;
- коррозией;
- неправильной технической эксплуатацией и обслуживанием.

Прогнозирование последствий утечек и их предупреждение – важные меры, направленные на повышение общей безопасности трубопроводного транспорта. Системы мониторинга, своевременное техническое обслуживание и регулярные проверки оборудования могут значительно снизить вероятность возникновения аварийных ситуаций.

Одним из методов повышения безопасности является разработка моделей расчета утечек, примеры которых представлены в данной работе. Моделирование процесса утечки позволяет точно оценить объем возможных потерь топлива и принять меры по устранению неисправностей до того, как ситуация перерастет в аварийную. В данной работе представлены результаты расчета времени утечки дизельного топлива через поврежденное технологическое оборудование, что может быть использовано для анализа и разработки профилактических мер на предприятиях трубопроводного транспорта.

Процесс истечения жидкости из резервуара через отверстие под воздействием силы тяжести является классической задачей гидравлики. Для его описания используются уравнения Бернулли и гидростатические законы. В данной работе мы рассматриваем дизельное топливо как несжимаемую жидкость с постоянной плотностью, что упрощает расчеты.

Одним из ключевых аспектов расчетов является определение эквивалентной площади отверстия, через которое происходит утечка топлива. Площадь отверстия влияет на скорость и объем вытекания жидкости, а также на изменение уровня жидкости в резервуаре. В нашей задаче использовалась следующая формула для расчета объема вытекшей жидкости через отверстие в крановом шаре:

$$Q = \mu S_0 \sqrt{2g \cdot H}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (1)$$

где μ – коэффициент расхода через отверстие;

S_0 – эквивалентная площадь отверстия, через которое вытекает жидкость, м^2 ;

H – уровень взлива жидкости в сосуде, м.

То есть уровень взлива – это высота открытой поверхности дизельного топлива в резервуаре относительно его основания. Так как при утечке уровень жидкости изменяется с течением времени, то такое движение жидкости является неустановившимся, а следовательно, при этом изменяется со временем и расход вытекающей жидкости.

За некоторое время dt из сосуда вытечет объем жидкости dW , а уровень взлива жидкости в нем понизится на величину dh . Полагаем, что за очень малый отрезок времени dt напор изменится настолько мало, что его изменением можно пренебречь и принять постоянным и равным H . Тогда для нахождения объема жидкости за очень малый отрезок времени dt продифференцируем формулу 1:

$$Qdt = \mu S_0 \sqrt{2gH} dt. \quad (2)$$

Одновременно с понижением уровня в резервуаре на dh объем жидкости в нем уменьшится на dW :

$$\begin{cases} Qdt = dW \\ dW = -Sdh \end{cases} \quad (3)$$

где S – площадь сечения сосуда, m^2 .

Знак минус в формуле 3 принят потому [4, с. 299; 5, с. 233], что напор H понижается.

Следовательно,

$$\mu S_0 \sqrt{2gh} dt = -Sdh. \quad (4)$$

Отсюда, разделив переменные в дифференциальном уравнении (4), получим

$$dt = -\frac{Sdh}{\mu S_0 \sqrt{2gh}}. \quad (5)$$

Для нахождения времени, за которое произойдет истечение жидкости с начального уровня взлива H_1 до конечного уровня взлива H_2 , проинтегрируем формулу 5 по граничным условиям H_1 и H_2 [4, с. 300]:

$$t = -\frac{1}{\mu S_0 \sqrt{2g}} \int_{H_1}^{H_2} S \frac{dh}{\sqrt{h}}, \quad (6)$$

где t – время, за которое произойдет истечение жидкости с начального уровня взлива H_1 до конечного уровня взлива H_2 ;

S – площадь сечения сосуда, m^2 ;

H_1 – начальный уровень взлива жидкости в резервуаре, м;

H_2 – конечный уровень взлива жидкости в резервуаре, м.

Эти вычисления справедливы для резервуара, для которого площадь сечения сосуда не изменяется в зависимости от уровня взлива жидкости, например, представляющего собой вертикальный цилиндр как резервуар вертикальный стальной (РВС). Но для расчета утечки из сосуда с изменяющимся сечением в зависимости от уровня взлива жидкости, например, резервуара горизонтального стального (РГС) или цистерны, расчет нужно производить несколько иначе.

Для определения времени истечения жидкости из горизонтального цилиндрического сосуда (рисунок 1) выразим зависимость переменной площади S от h :

$$S = 2L\sqrt{h(D-h)}, \quad (7)$$

где L – длина сосуда, м;

D – диаметр сосуда, м;

h – уровень взлива жидкости в сосуде.

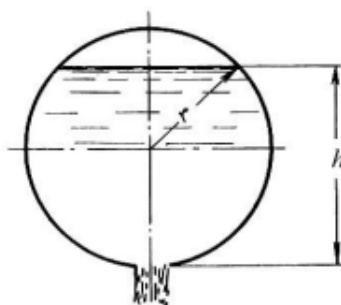


Рисунок 1. – Схема опорожнения непризматического резервуара

Подставим в формулу (6) зависимость переменной площади S от h (7) и получим:

$$t = -\frac{1}{\mu S_0 \sqrt{2g}} \int_{H_1}^{H_2} 2L \frac{\sqrt{h(D-h)} dh}{\sqrt{h}}. \quad (8)$$

Для проведения расчетов времени утечек и объема потерянного топлива использовались реальные данные о состоянии резервуаров на предприятии. Было рассмотрено два случая аварийных утечек дизельного топлива. В первом примере утечка происходила через негерметичную задвижку технологического резервуара, а во втором – через отверстие в стенке горизонтального резервуара Р-25.

Рассмотрим утечку через задвижку. В качестве исходных данных для расчетов были взяты измерения, полученные в ходе осмотра резервуаров на предприятии. Утечка была обнаружена через 17 часов с момента предыдущего осмотра и ликвидирована за общий час. В частности, было установлено, что за 9 минут 43 секунды дизельное топливо через негерметичную задвижку заполнило 20-литровый мерник. На основании этих данных можно было рассчитать расход топлива и определить эквивалентную площадь отверстия, через которое происходила утечка.

Для начала был рассчитан расход топлива с использованием следующей формулы:

$$q = V_1/t, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (9)$$

где q – расход топлива, $\text{м}^3/\text{с}$;
 V – объем вытекшего топлива, м^3 ;
 t – время, за которое был измерен этот объем, с.

$$q = \frac{20 \cdot 0,001}{9 \cdot 60 + 43} = 3,43053 \cdot 10^{-5}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (10)$$

На следующем этапе с помощью полученного значения расхода был рассчитан эквивалентный диаметр отверстия, через которое вытекало дизельное топливо. Для этого использовалась формула:

$$S_0 = \frac{q}{\mu} \sqrt{2g \cdot H}, \text{ м}^2, \quad (11)$$

где S_0 – эквивалентная площадь отверстия, через которое вытекает дизельное топливо, м^2 ;
 q – расход, с которым вытекает дизельное топливо, $\text{м}^3/\text{с}$;
 μ – коэффициент расхода, согласно [4, с. 297, таблица 16.2], $\mu = 0,6$;
 H – начальный уровень топлива в резервуаре.
 Подставляя известные значения в формулу, получили:

$$S_0 = \frac{3,43053 \cdot 10^{-5}}{0,6} \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 3,101} = 7,3301 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 = 7,33 \text{ мм}^2.$$

Таким образом, эквивалентная площадь отверстия составила $7,33 \text{ мм}^2$.

Для нахождения уровня топлива в резервуаре $z(t)$, установившегося после 17 и 18 часов вытекания дизельного топлива, воспользуемся следующей формулой [6, с. 208]:

$$z(t) = \left(\sqrt{H} - \frac{\mu S_0 \sqrt{2g} t}{2S} \right)^2. \quad (12)$$

При этом учитывалась площадь сечения резервуара, которая была рассчитана по формуле:

$$S = \pi \frac{D^2}{4}, \text{ м}^2, \quad (13)$$

где $D = 14,552 \text{ м}$ – диаметр резервуара.

$$S = \pi \frac{14,552^2}{4} = 166,232 \text{ м}^2.$$

Площадь сечения составила $166,232 \text{ м}^2$. Далее было рассчитано изменение уровня топлива за 17 и 18 часов. Для 17 часов уровень топлива составил $3,30694 \text{ м}$, что привело к потере $1819,73 \text{ кг}$ дизельного топлива. Для 18 часов уровень снизился до $3,30618 \text{ м}$, что соответствует утечке уже $1926,66 \text{ кг}$.

Для нахождения времени полного вытекания некоторого значения, например, 14 т топлива, была использована формула:

$$t = \frac{2S}{\mu S_0 \sqrt{2g}} (\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2}),$$

где H_1 – начальный уровень взлива дизельного топлива в резервуаре, м;
 H_2 – конечный уровень взлива дизельного топлива в резервуаре, м [7, с. 35].
 Результаты расчета показали, что полное вытекание данного объема топлива займет 5 суток 12 часов 49 минут. Дополнительно мы определили интенсивность процессов вытекания дизельного топлива в различные периоды времени. По вышеприведенной формуле (9) построен график зависимости потерь дизельного топлива от времени вытекания (рисунок 2).

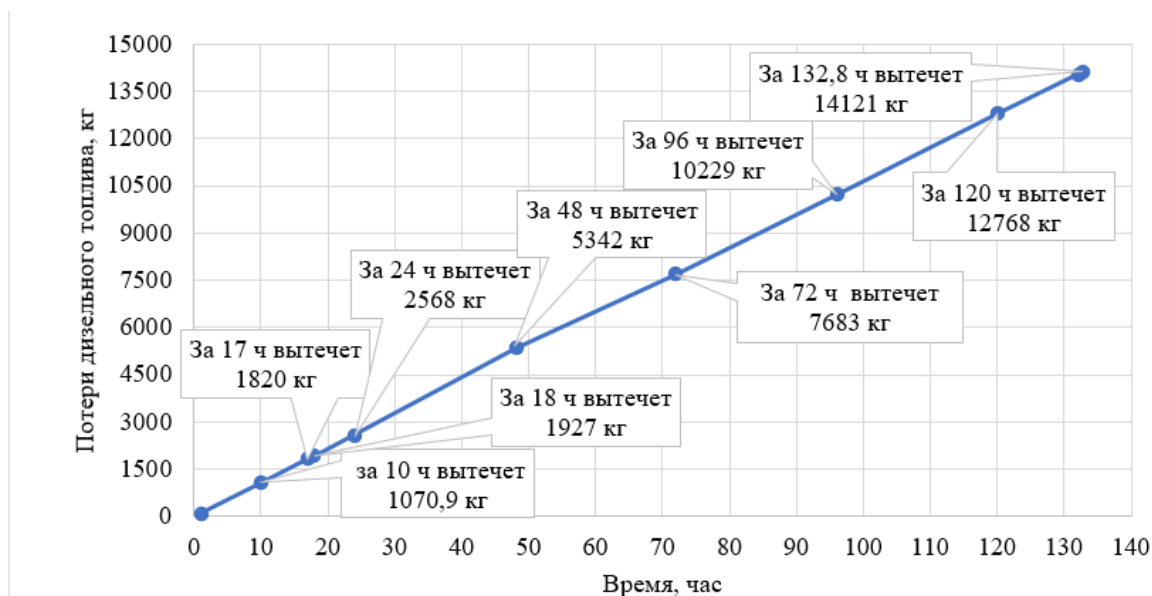


Рисунок 2. – Зависимость потерь дизельного топлива от времени вытекания

Согласно этому графику, мы можем выявить отношение массы потери дизельного топлива и количества времени, за которое такие потери могут произойти. Так, за первые 10 часов масса потери составит 1070,86 кг. За условные 17 часов утерянное дизельное топливо составляет 1819,73 кг, за 18 часов – 1926,66 кг и так далее.

На основании расчетов были получены следующие результаты:

- эквивалентная площадь отверстия составила 7,33 мм²;
- время полного вытекания 14 121 кг дизельного топлива – 5 суток 12 часов 49 минут;
- за 17 часов было потеряно 1819,73 кг топлива, за 18 часов – 1926,66 кг.

Данный вариант аварии является не распространенным, но показательным случаем попадания загрязняющего вещества в окружающую среду.

Во втором случае утечка произошла через коррозионное отверстие в стенке горизонтального резервуара Р-25 объемом 25 254 л. Утечка обнаружена в момент потери 2933 л дизельного топлива. Так как размеры отверстия не представлялось возможным установить, то для расчета времени утечки были рассмотрены три диаметра отверстий: 6 мм, 10 мм и 15 мм.

Для нахождения времени, за которое вытечет 2933 л дизельного топлива, воспользуемся формулой (8):

$$t = -\frac{1}{\mu S_0 \sqrt{2g}} \int_{H_1}^{H_2} 2L \frac{\sqrt{h(D-h)} dh}{\sqrt{h}},$$

где H_1 – начальный уровень взлива дизельного топлива в резервуаре, $H_1 = 2,515$ м;
 H_2 – конечный уровень взлива дизельного топлива в резервуаре, $H_2 = 2,168$ м;
 S_0 – эквивалентная площадь отверстия, через которое вытекает дизельное топливо, м²;
 μ – коэффициент расхода, согласно [4, с. 297, таблица 16.2], $\mu = 0,6$;
 D – диаметр горизонтального резервуара Р-25, $D = 2,768$ м;
 L – длина горизонтального резервуара Р-25, $L = 4,846$ м.
Например, для отверстия с диаметром 6 мм его площадь составит 0,00002826 м², тогда:

$$t = -\frac{1}{0,6 \cdot 0,00002826 \cdot \sqrt{2g}} \int_{2,515}^{2,168} 2 \cdot 4,846 \frac{\sqrt{h(2,768-h)} dh}{\sqrt{h}} = 8,06 \text{ ч.}$$

То есть дизельное топливо объемом 2933 л вытечет из эквивалентного диаметра отверстия 6 мм за 8 часов. Аналогично для следующих случаев проведем расчеты времени полного вытекания топлива:

- при диаметре отверстия 10 мм – 2 часа 54 минуты;
- при диаметре отверстия 15 мм – 1 час 18 минут.

Эти данные показывают, что даже небольшие отверстия могут приводить к быстрым и значительным потерям топлива.

Дополнительно к данному случаю мы определили интенсивность процессов вытекания дизельного топлива за различные отрезки времени из отверстия 6, 10 и 15 мм. По вышеприведенной формуле (8) построен график зависимости потерь дизельного топлива от времени вытекания (рисунок 3).

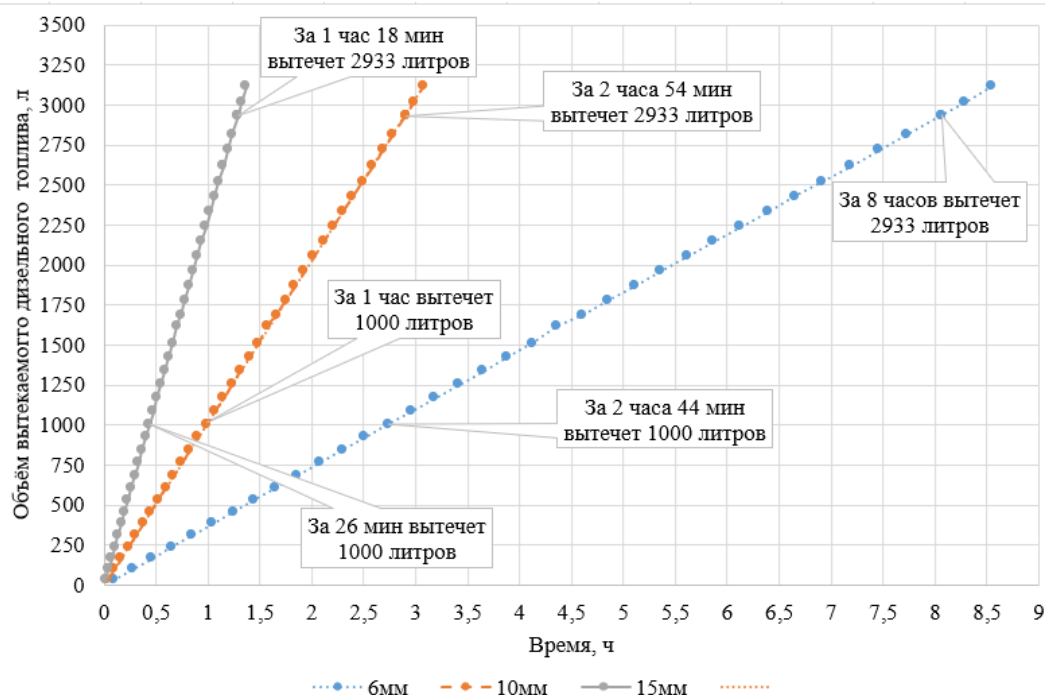


Рисунок 3. – Зависимость потерь дизельного топлива от времени вытекания

Необходимо отметить, что приведенные на рисунке 3 графики не являются прямыми линиями, а по интегральной зависимости отображают изменение вытекающего объема топлива в зависимости от времени с учетом закругленности стенки резервуара. От верха до середины резервуара идет увеличение сечения открытой поверхности топлива, а от середины до низа резервуара идет уменьшение сечения открытой поверхности топлива.

Согласно этому графику, мы можем выявить отношение объема потери дизельного топлива и времени, за которое такие потери могут произойти. Так, 1000 л дизельного топлива вытечет из горизонтального резервуара Р-25 при эквивалентном диаметре отверстия 6 мм за 26 минут; при эквивалентном диаметре отверстия 10 мм – за 1 час; при эквивалентном диаметре отверстия 15 мм – за 2 часа 44 минуты.

Результаты расчетов указывают на значительные потери топлива при длительных утечках даже при сравнительно малых отверстиях. Полученные данные подчеркивают важность своевременного обнаружения утечек и их ликвидации. Рассчитанная интенсивность вытекания демонстрирует, что на ранних этапах процесс идет с наибольшей скоростью, что обусловлено высоким давлением столба жидкости в резервуаре. Снижение уровня топлива приводит к уменьшению скорости вытекания, однако суммарные потери становятся значительными.

Заключение. На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

1. Разработаны зависимости, позволяющие описать процесс вытекания дизельного топлива из горизонтальных и вертикальных резервуаров, что дало возможность установить закономерности изменения скорости и объема утечки в зависимости от характеристик резервуара и размера отверстия. Эти зависимости могут быть использованы для оперативной оценки потерь топлива при аварийных ситуациях на предприятиях, где нефтепродукты хранятся в резервуарах.

2. Определены численные параметры возможных потерь топлива для различных сценариев. Так, полное вытекание 14 121 кг дизельного топлива через негерметичную задвижку резервуара может занять 5 суток 12 часов 49 минут. Этот расчет демонстрирует, что даже небольшие утечки, оставшиеся незамеченными, могут приводить к значительным потерям топлива.

3. Проведенные расчеты показали высокую скорость утечки при сравнительно малых диаметрах отверстий. Утечка 2933 л дизельного топлива через отверстие диаметром 6 мм происходит за 8 часов, а через отверстие диаметром 15 мм – всего за 1 час 18 минут. Это подчеркивает важность регулярного мониторинга состояния оборудования и систем хранения для оперативного обнаружения и устранения небольших повреждений, которые могут перерасти в серьезные утечки.

4. Полученные данные подчеркивают необходимость систематического контроля и профилактического обслуживания резервуаров и технологического оборудования, включая мониторинг коррозионных повреждений и износа задвижек, чтобы снизить вероятность утечек.

5. Предложенные зависимости и методы расчета могут применяться при планировании мероприятий по обеспечению безопасности на промышленных предприятиях и использоваться в моделях для оценки возможных потерь топлива и определения временных характеристик утечек. Это позволит более точно прогнозировать развитие аварийной ситуации и принимать своевременные меры для минимизации последствий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пожарная опасность резервуарных парков нефтепродуктов / Д.В. Николаев, Д.Ю. Легенький, А.В. Сальников и др. // International scientific review of the problems and prospects of modern science and education: LXXV International correspondence scientific and practical conference, Бостон, 22–23 нояб., 2020 г. / Под ред. Э. Морган. – Бостон, 2020. – С. 5–8. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/pozharnaya-opasnost-rezervuar-nyh-parkov-nefteproduktov> (дата обращения: 15.10.2024).
2. Самкаева А.Ф. Коррозия нефтяных резервуаров и перспективные способы их защиты // Вестн. магистратуры. – 2022. – № 6–1(129). – С. 17–18. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/korroziya-neftyanyh-rezervuarov-i-perspektivnye-sposoby-ih-zaschity> (дата обращения: 15.10.2024).
3. Демельханов М.Д., Оказова З.П., Чупанова И.М. Экологические последствия разливов нефти // Успехи современного естествознания. – 2015. – № 12. – С. 91–94. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=35730> (дата обращения: 15.10.2024).
4. Альтшуль А.Д., Киселев П.Г. Гидравлика и аэродинамика (Основы механики жидкости): учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1975. – 323 с.
5. Ухин Б.В., Гусев А.А. Гидравлика: учеб. – М.: ИНФРА-М, 2010. – 432 с.
6. Лурье М.В. Задачник по трубопроводному транспорту нефти, нефтепродуктов и газа: учеб. пособие для вузов. – М.: Недра-Бизнесцентр, 2003. – 349 с.
7. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов. – М.: Академия, 2006. – 560 с.

REFERENCES

1. Nikolaev, D.V., Legen'kii, D.Yu., Sal'nikov, A.V. & Borisova, M.Yu. (2020). Pozharnaya opasnost' rezervuar-nykh parkov nefteproduktov [Fire hazard of reservoir farms petroleum products]. In E. Morgan (Eds.) *International scientific review of the problems and prospects of modern science and education: LXXV International correspondence scientific and practical conference*, Boston, 22–23 noyab., 2020 g. (5–8). Boston. (In Russ., abstr. in Engl.). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/pozharnaya-opasnost-rezervuar-nyh-parkov-nefteproduktov>.
2. Samkaeva, A.F. (2022). Korroziya neftyanykh rezervuarov i perspektivnye sposoby ikh zashchity. *Vestn. magistratury*, 6–1(129), 17–18. (In Russ.). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/korroziya-neftyanyh-rezervuarov-i-perspektivnye-sposoby-ih-zaschity>.
3. Demel'khanov, M.D., Okazova, Z.P. & Chupanova, I.M. (2015). Ekologicheskie posledstviya razlivov nefi [Environmental impacts of oil spills]. *Uspekhii sovremennogo estestvoznaniya [Advances in current natural sciences]*, (12), 91–94. (In Russ., abstr. in Engl.). URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=35730>.
4. Al'tshul', A.D. & Kiselev, P.G. (1975). *Gidravlika i aerodinamika (Osnovy mekhaniki zhidkosti): ucheb. posobie dlya vuzov. 2-e izd., pererab. i dop.* Moscow: Stroizdat. (In Russ.).
5. Ukhin, B.V. & Gusev, A.A. (2010). *Gidravlika: ucheb.* Moscow: INFRA-M. (In Russ.).
6. Lur'e, M.V. (2003). *Zadachnik po truboprovodnomu transportu nefi, nefteproduktov i gaza: ucheb. posobie dlya vuzov.* Moscow: Nedra-Biznestsentr. (In Russ.).
7. Trofimova, T.I. (2006). *Kurs fiziki: ucheb. posobie dlya vuzov.* Moscow: Akademiya. (In Russ.).

Поступила 06.02.2025

ASSESSMENT OF THE AMOUNT OF POLLUTANTS
RELEASED AS A RESULT OF ACCIDENTAL LEAKS INTO THE ENVIRONMENT

V. IVANOV¹⁾, I. LEONOVICH²⁾, A. KULBEI³⁾, V. BERDASHKEVICH⁴⁾

^(1), 3), 4) Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk,

²⁾ Gubkin Russian State University of Oil and Gas, Moscow)

The article presents an analysis of emergency diesel fuel leaks and their impact on the environment. Examples of emergency situations are described, according to which calculations of the time of fuel leakage through technological openings from storage tanks are carried out. Emphasis is placed on the assessment of environmental risks associated with soil and water pollution, as well as measures to prevent leaks. The article emphasizes the importance of timely detection and elimination of leaks, as well as the development of effective measures to prevent them to improve environmental safety at petroleum product storage facilities.

Keywords: environment, emergency leakage, soil pollution, leak monitoring, environmental safety.

УДК 622.22:504.062:556.56

DOI 10.52928/2070-1683-2025-40-1-58-66

**СТАДИИ ПОВТОРНОГО ЗАБОЛАЧИВАНИЯ НА ВЫРАБОТАННОМ УЧАСТКЕ
ТОРФЯНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ НИЗИННОГО ТИПА ИВАНОВСКОЕ**

*канд. техн. наук, доц. О.Н. РАТНИКОВА, канд. техн. наук, доц. В.А. РАКОВИЧ,
Т.Д. ЯРМОШУК, И.П. ЛИСИЦЫНА, А.Т. БОРИШ
(Институт природопользования НАН Беларуси, Минск)*

В статье рассмотрены основные стадии повторного заболачивания выработанного торфяного месторождения низинного типа Ивановское на основании восьмилетних наблюдений. Анализ основных параметров уровней грунтовых вод (высоких, средних, низких годовых и месячных значений уровней грунтовых вод и амплитуды колебаний, а также хода кривой относительно поверхности земли), значений окислительно-восстановительного потенциала, общей минерализации, кислотности, сукцессии растительности и выбросов парниковых газов (СО₂-экв.) позволил сделать выводы, что торфяник после выполнения мероприятий экологической реабилитации проходит три стадии восстановления. Проведенные мероприятия способствовали повышению среднегодовых значений уровней грунтовых вод до уровня поверхности земли, восстановлению видового разнообразия болотных фитоценозов (в настоящее время преобладают тростниково-осоковые фитоценозы), сокращению выбросов парниковых газов в 2,4 раза.

Ключевые слова: *выработанное торфяное месторождение, мероприятия экологической реабилитации, уровни грунтовых вод, выбросы парниковых газов, стадии повторного заболачивания.*

Введение. Болота имеют приоритетное значение для поддержания экологической стабильности в природной среде Беларуси. Они занимают около 12% от всей территории республики и выполняют важнейшие функции, будучи в естественном или восстановленном состоянии. Анализ проведенной инвентаризации показал наличие в Беларуси 284,8 тыс. га торфяных месторождений, выбывших из промышленной эксплуатации, из них 143,3 тыс. га подлежат экологической реабилитации, более 83,8 тыс. га частично или полностью обводнены и находятся в процессе восстановления, остальные 58,5 тыс. га эффективно используются для сельского и лесного хозяйств. Кроме этого выявлено 89,8 тыс. га болот с нарушенным гидрологическим режимом, рекомендуемых для экологической реабилитации¹. Существует единственный способ реабилитации антропогенно нарушенных болот – их повторное заболачивание.

В условиях Беларуси экологическую реабилитацию возможно проводить на всех без исключения выработанных торфяных месторождениях независимо от их природно-генетических особенностей. Отличительной чертой выработанных участков торфяного месторождения являются более низкие отметки поверхности по сравнению с первоначальным состоянием болота, оставшийся нижний слой инертного горизонта находится в зоне аэрации, в котором интенсивно протекают процессы горизонтальной и вертикальной фильтрации.

Восстанавливаемые болота являются быстро меняющимися и развивающимися экологическими системами, проходящими последовательные стадии восстановления болотообразования и накопления торфа. Продолжительность стадий восстановления выработанных участков торфяных месторождений будет иметь различный период в зависимости от их геоморфологии, рельефа, времени после выработки, типа оставшегося слоя торфяной залежи и его глубины, условий водного питания, подстилающих пород и др.

Цели и задачи. Для количественной оценки стадий повторного заболачивания, а также динамики восстановления болотообразовательного процесса на выработанном участке торфяного месторождения низинного типа проанализировали основные параметры уровней грунтовых вод до и после проведения мероприятий экологической реабилитации: высокие, средние, низкие годовые и месячные значения уровней грунтовых вод (далее – УГВ) и амплитуды их колебаний, а также ход кривой относительно поверхности земли; значения окислительно-восстановительного потенциала (далее – ОВП); кислотность; сукцессию растительности и изменение выбросов парниковых газов (СО₂-экв.).

Ренатурировать выработанное торфяное месторождение, т.е. полностью восстановить всю совокупность природных компонентов нарушенных болотных экосистем, невозможно вследствие значительного антропогенного воздействия. Однако можно восстановить способности нарушенных болот к выполнению биосферных и природно-хозяйственных функций. Мероприятия по экологической реабилитации нарушенного в результате промышленной эксплуатации торфяного месторождения направлены, прежде всего, на поднятие и стабилизацию УГВ равномерно по всей площади восстанавливаемого участка до уровня поверхности земли. При этом параметрами, обеспечивающими восстановление процессов образования и накопления торфа, являются: среднегодовые значения УГВ до –20 см и амплитуды колебаний менее 50 см (знак «–» говорит о положении УГВ ниже поверхности земли, «+» – выше поверхности земли) [1].

¹ Схема распределения торфяников по направлениям использования на период до 2030 г. Утв. постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 30.12.2015 г. № 1111.

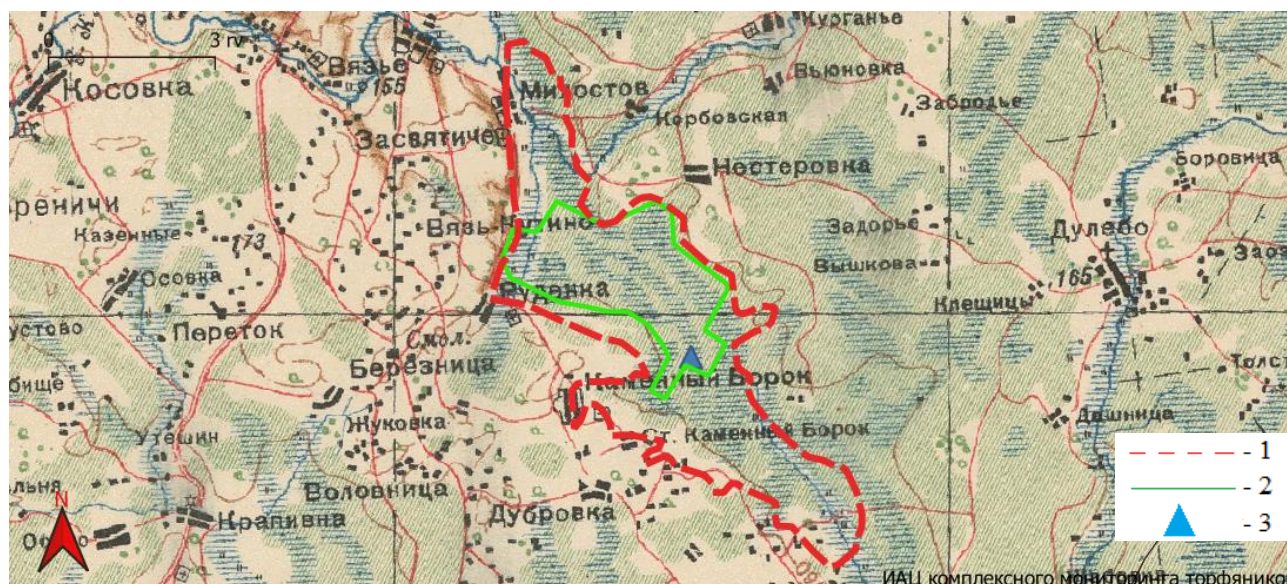
Результаты исследований. Исследуемое торфяное месторождение Ивановское, расположенное в Березинском районе Минской области в среднем течении р. Березина, относится к Центральноберезинской водно-ледниковой равнине.

В геоструктурном отношении территория приурочена к Оршанской впадине, Белорусской антеклизе и Жлобинской седловине. Поверхность коренных пород слагают девонские пески, глины, мергели, доломиты, а на востоке – мергельно-меловая толща верхнего мела. Моренная равнина расчленена ложбинами стока, по склонам речных долин имеются овраги и балки. Повсеместно встречаются заболоченные термокарстовые западины. Ложем антропогенных отложений служат пески, алевриты и мергели среднего девона, под которыми залегают глины, мергели, доломиты и песчаники также девонского возраста [2].

Болото располагается в котловине, образованной в результате эрозионной деятельности древних ледниковых потоков. На начальной стадии накопления торфа (до гидротехнической мелиорации) процессы происходили путем заторфывания водоемов на дне котловины и заболачивания пониженных ложбин, на дне которых откладывался сапропель. Постоянное избыточное увлажнение паводковыми, грунтовыми и речными водами, наносы с окружающих суходолов растворенных минеральных солей создали предпосылки для заболачивания пойм р. Ольса и Клева и накопления торфа. Постепенно образовавшиеся небольшие болота слились в один массив. Торфообразование происходило в условиях богатого водно-минерального питания также за счет активной разгрузки грунтовых вод.

Большая площадь водосбора сточных вод и грунтовые воды обусловили высокую проточность, что тоже обеспечивало обильное водно-минеральное питание болотной растительности и способствовало образованию торфа низинного типа (96%). В строении торфяной залежи принимали участие 20 видов торфа, преобладающими из которых являются осоковый низинный, древесно-осоковый, древесный, древесно-тростниковый и тростниковый низинный торф. Подстилающими торф грунтами являлись в основном пески пылеватые, мелкозернистые пески и супеси. В отдельных местах под слоем торфа, где в начальной стадии развития болота были водоемы, встречены сапропелевые отложения.

Гидрологические условия болота определялись геологическим строением района и его климатом. Исследуемый участок торфяного месторождения расположен в котловинообразном понижении, что определяет нахождение грунтовых вод непосредственно вблизи поверхности на расстоянии 0,5–1,2 м. Воды безнапорные. Разгрузка верхних горизонтов подземного стока производится на уровне существующих эрозионных базисов: системы валовых и магистральных каналов, впадающих в р. Ольса. Амплитуда колебаний отметок поверхности торфяника – 154–165 м. Северо-западная часть месторождения занимает пойму р. Клева, а юго-восточная – пойму р. Ольса. Исследуемый участок расположен в южной части торфяника в пойме р. Ольса (рисунок 1).



1 – нулевая граница торфяного месторождения; 2 – исследуемый участок; 3 – исследуемая площадка

Рисунок 1. – Карта-схема расположения гидрологической сети до осушения на торфянике Ивановское

На нулевой стадии своего существования, т.е. после выбытия из промышленной эксплуатации, исследуемый участок длительное время находился в осушенном состоянии. Опираясь на известные биофизические свойства болот как природных образований, благодаря проведенным в 2014 г. исследованиям оценили экологическое состояние основных компонентов природной среды исследуемого торфяного месторождения.

Торфяное месторождение Ивановское представляло собой плоскую сильно осушенную поверхность с оставшимся слоем торфяной залежи – 0,1–0,5 м, местами подстилаемую сапропелем. Оставшийся слой торфяной залежи представлен осоковым, тростниково-осоковым, древесно-осоковым видами торфа; степень разложения торфа – 30–40%; влажность торфа – 86–87%; зольность – 7,45–26,90% (в нижнем слое примесь песка).

Изменение водного режима с последующей выработкой торфа привело к остановке процессов накопления органического вещества, и болотная экосистема потеряла устойчивость, прекратив свое существование.

Схема осушения для промышленного использования, а именно разработка торфяных месторождений для топливной энергетики в Беларуси, включала системы каналов: магистрального и валовых, расстояние между которыми 500–1000 м, и картовых (40–50 м). При такой схеме осушения наименьшее допустимое значение УГВ посередине между картовыми каналами (норма осушения) составляла не менее 1,0 м ниже поверхности земли. Согласно строительному проекту 2005 г., осушение исследуемого участка площадью 669 га осуществлялось сетью открытых валовых и картовых каналов в магистральный с помощью стационарной насосной станции или самотеком в р. Ольсу.

После осушения сложился специфический гидрологический режим (до экологической реабилитации), четко не прослеживались характерные фазы развития, присущие болоту в естественном состоянии. На режим грунтовых вод влияло регулирование магистрального и валовых каналов на прилегающих территориях.

Большую часть года грунтовые воды расположены на уровне –60 см, в меженный период УГВ опускались до отметок –88...–104 см, что ниже дна осушительного картового канала. Среднемесячная амплитуда колебаний УГВ нестабильна на протяжении всего гидрологического года и менялась в широком диапазоне 7–37 см (рисунки 2, 3). Подъем грунтовых вод начинался одновременно с началом снеготаяния. Величина весеннего подъема, при глубине УГВ зимой –26...–67 см, составила –18...–36 см. Величина деятельного горизонта, в котором активно шли процессы минерализации оставшегося слоя торфяной залежи, составляла –1,0 м. Имело место вторичное зазольнение торфяной залежи.

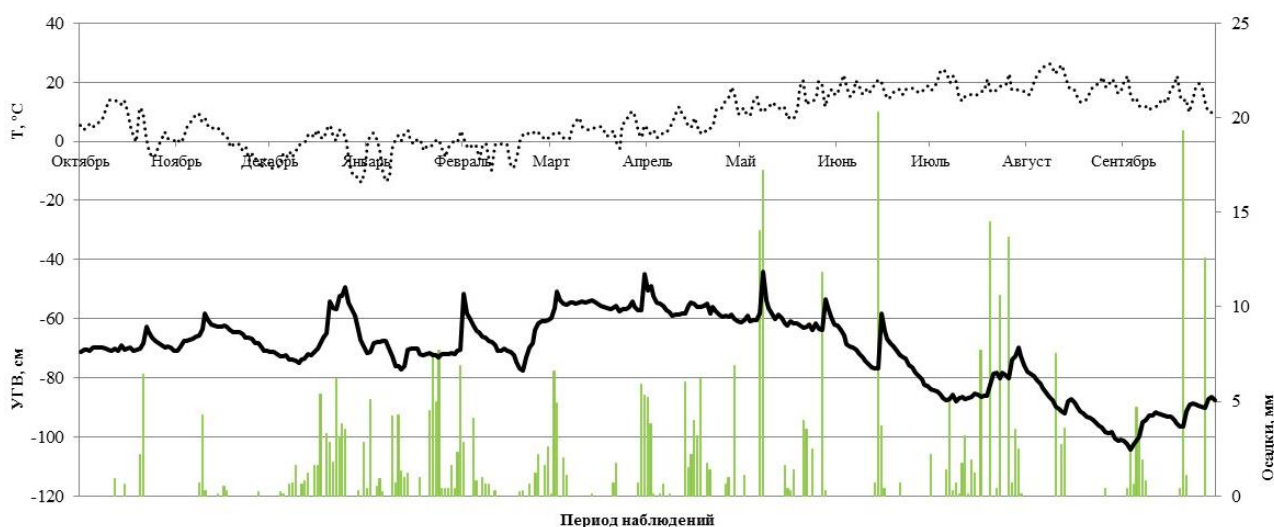


Рисунок 2. – Динамика изменения температуры воздуха, УГВ и осадков на торфяном месторождении Ивановское до экологической реабилитации

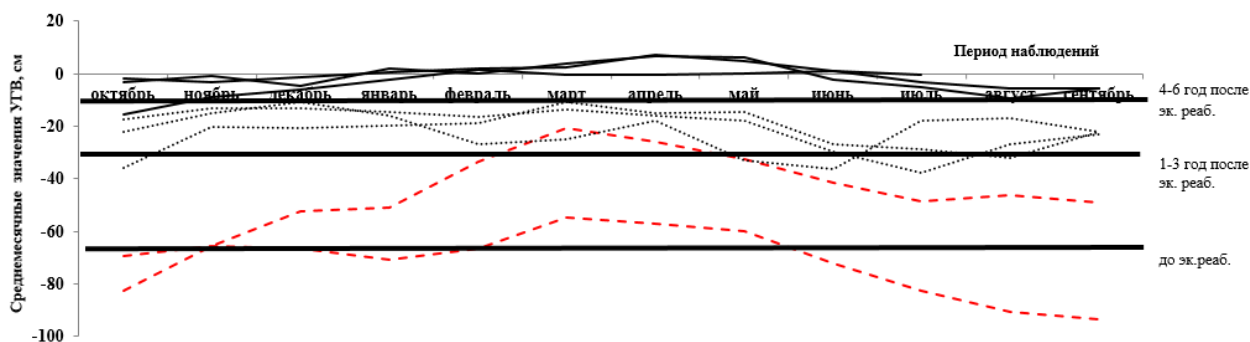


Рисунок 3. – Динамика изменения среднемесячных значений средних, амплитуды колебаний и низких УГВ в период 2014–2022 гг. наблюдений на торфяном месторождении Ивановское (начало)

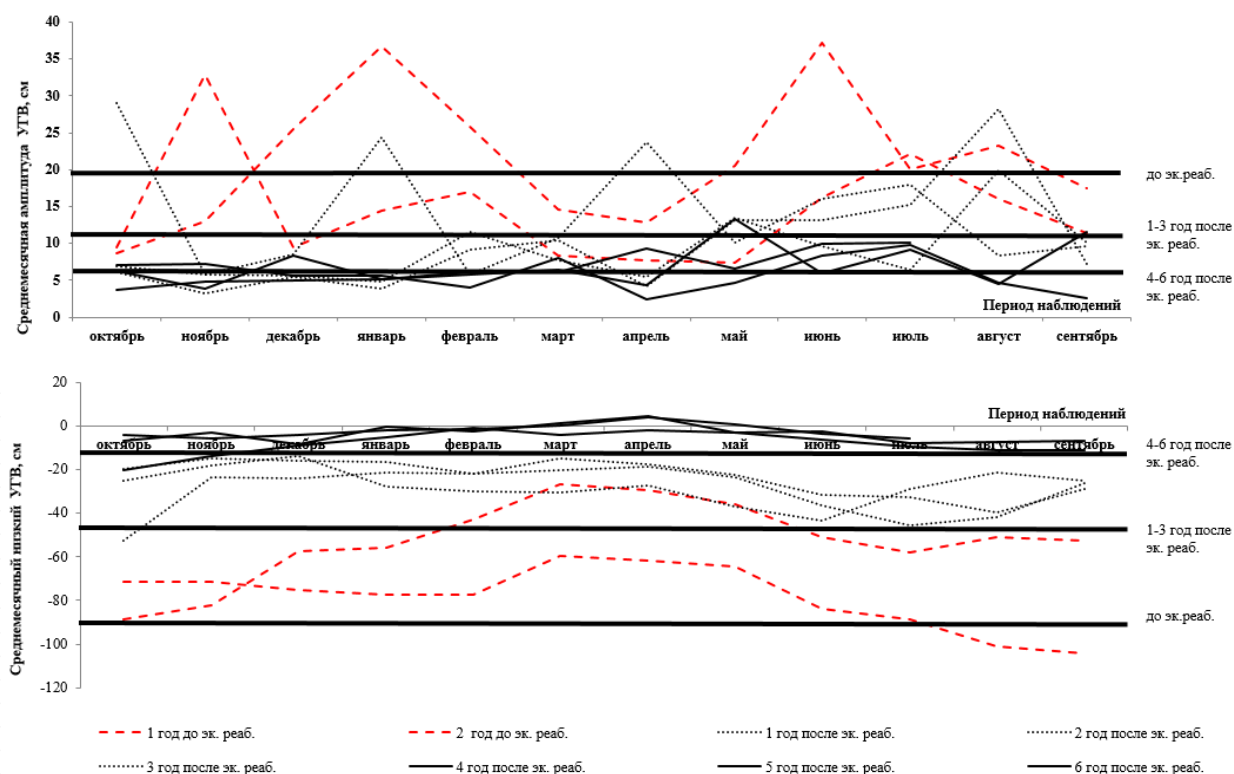


Рисунок 3. – Динамика изменения среднемесячных значений средних, амплитуды колебаний и низких УГВ в период 2014–2022 гг. наблюдений на торфяном месторождении Ивановское (окончание)

После прекращения добычи торфа сформировался контрастный амфибиальный водно-воздушный режим с резкой сменой окислительных и восстановительных процессов с преобладанием окислительных; ОВП колебался от +138 до +203 мВ в зависимости от погодных условий, сформировав специфический микроландшафт (рисунок 4); общая минерализация воды колебалась 210–420 мг/л, кислотность – 7,2–6,8.



Рисунок 4. – Состояние болотных фитоценозов на исследуемой площадке торфяного месторождения Ивановское до экологической реабилитации (начало)



Рисунок 4. – Состояние болотных фитоценозов на исследуемой площадке торфяного месторождения Ивановское до экологической реабилитации (окончание)

Используя методику GEST² [3], исследуемый участок можно подразделить на следующие вегетационные (растительные) формы сообществ, выступающие в качестве индикаторов уровней грунтовых вод и позволяющие рассчитать эмиссии парниковых газов:

- «Влажное разнотравье и луга» (17,4% территории): представлена мелиоративнопроизводными осоковыми и папоротниковыми пушистоберезняками, чередовались участки сильно заболоченные и более дренированные;
- «Очень влажный травостой» (41,8%): в напочвенном покрове доминировали виды болотной группы, болотно-травянистая растительность на заболоченных и затопленных участках, заросших тростником, рогозом широколистным, осоками;
- «Мокрый травостой и осоковые низинные болота» (9,3%): болотно-травянистая растительность на заболоченных участках, где чередовались фрагменты сообществ, сформированных пушицей многоколосковой, осоками и тростником;
- «Открытый торф» (2,4%): участки, на которых более 50% занимает открытый торф;
- остальная часть территории относилась к форме «Умеренно влажное разнотравье и луга»: представлена сорной и рудеральной растительностью.

Расчетные данные факторов выбросов парниковых газов с исследуемого участка торфяного месторождения Ивановское оценивались в 10,1 т CO₂-экв./га в год согласно методикам зарубежных авторов [4–6], проверенным и адаптированным к условиям Беларуси в рамках исследований [7]. Эмиссия CO₂ с исследуемого участка составляла 7,3 т CO₂-экв./га в год, CH₄ – 2,8 т CO₂-экв./га в год, эмиссия N₂O незначительна.

Работы по восстановлению гидрологического режима торфяного месторождения Ивановское проводились в осенне-зимний период 2015 г. в рамках проекта Программы развития ООН и Глобального экологического фонда «Управление торфяниками на основе ландшафтных подходов с целью получения многосторонних экологических выгод» («Торфяники-2»), реализуемого в партнерстве с Министерством природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь. Цель проекта – снизить выбросы парниковых газов (CO₂, CH₄, N₂O) и минерализацию торфа, сократить риск возникновения торфяных пожаров, создать благоприятные условия произрастания болотной растительности и обитания животных, стимулировать естественное восстановление нарушенной экосистемы болота.

Болотные фитоценозы произрастают в условиях полного или почти полного насыщения почвы влагой и преобладания восстановительных процессов. На осушенном участке, где остаточный слой торфа подстилается сапропелем, в периоды с большим количеством осадков интенсивно произрастали болотные фитоценозы, но после наступления даже кратковременных засух поселившаяся болотная растительность погибает из-за иссушения торфяного слоя. Именно эта причина – частая смена окислительно-восстановительных условий – не позволяла без применения мероприятий экологической реабилитации зарастать участкам, выбывшим из промышленной эксплуатации, ни болотной, ни суходольной растительностью.

Восстановление болотообразовательного процесса на таких участках, подстилающих остаточный слой торфа, грунтов, возможно только после поднятия УГВ до уровней поверхности земли с минимальной амплитудой колебаний в течение гидрологического года, создав типичные гидрологические условия.

² Научное обоснование экологической реабилитации неэффективно осушенных торфяников путем повторного заболачивания. Проектная территория «Вольсинское» в Березинском районе Минской области / НАН Беларуси, Ин-т экспериментальной ботаники, науч. рук. А.В. Судник. – Минск: Бел. наука, 2014. – 53 с. № регистрации проекта международной технической помощи в Министерстве экономики РБ 2/12/000571 от 30.11.2012 ATLAS №82884.

На первой стадии повторного заболачивания после проведения мероприятий экологической реабилитации, направленных на избыточное накопление влаги (повторное увлажнение) в поверхностном остаточном слое торфяной залежи, происходило ухудшение ее аэрации и, как следствие, быстрое отмирание суходольного травяного покрова (около одного года), постепенное более медленное – древесного и древесно-кустарничкового (два-три года), при этом общая минерализация – 225–346 мг/л, кислотность – 6,3–6,9, водно-воздушный режим не стабилен, ОВП – от –016 до +150 мВ, происходила смена окислительного процесса на восстановительный, что способствовало сукцессионной динамике растительности. На исследуемой площадке в первый год наблюдалось интенсивное зарастание кустарниками ивы (сосна – в угнетенном состоянии), на открытых участках торфа – травяной растительностью (тростником, рогозом широколистным, осоками), уровень воды в каналах доходил до бровки, что способствовало его зарастанию древесной и древесно-кустарниковой растительностью.

В первые три года после проведения мероприятий экологической реабилитации (2016–2019 гг.) прослеживалось уменьшение диапазона колебаний средних УГВ относительно поверхности земли в течение всего гидрологического года, их значение составило –21 см. Месячная амплитуда колебаний – 3–30 см в зависимости от водности месяца, при таких условиях торфяная залежь все еще не способна удерживать влагу, однако происходит сокращение деятельного горизонта в два раза (–47 см) (см. рисунки 3, 5).

Территория Березинского района отличается достаточным увлажнением – 684 мм в год. Однако отмечаются засушливые периоды и периоды избыточного увлажнения, что объясняется неравномерным распределением осадков по времени. За восьмилетний период исследований наблюдались годы разной водности, в засушливые годы выпадало около 430 мм (2014–2015 гг.), 595 мм (2018–2019 гг.), а в наиболее влажные годы – свыше 700 мм (2016–2018 гг., 2020–2021 гг.). В теплое время года – с апреля по октябрь – около 421 мм, т.е. приблизительно 65,7% от годового количества осадков. Среднегодовая температура воздуха находилась в пределах 7,9–9,1°C³.

Исследуемая территория (около 86%) стала относиться к GEST «Очень влажный травостой», бывшие участки открытого торфа трансформировались во «Влажное разнотравье и луга», а участок «Мокрый травостой и осоковые низинные болота» остался в прежнем состоянии, что привело к поглощению диоксида углерода с восстановленного участка до –0,1 т CO₂-экв./га за год, однако эмиссии метана увеличились до 4,3 т CO₂-экв./га в год, что вызвано деятельностью анаэробных метаногенных микроорганизмов [3–5]. Общие выбросы парниковых газов с восстановленного участка составили 4,2 т CO₂-экв./га за год.

В лабораторных условиях научным сотрудником лаборатории биогеохимии и агроэкологии Института природопользования НАН Беларуси Т.Д. Ярмошук проведен ряд экспериментов по имитации повторного заболачивания выбывших из промышленной эксплуатации торфяников с крапивой двудомной *Urtica dioica* [8], а также с композициями лугового разнотравья, ситника развесистого *Juncus effusus* и канареечника тростниковидного *Phalaris arudinacea*. Установлено, что удаление корнеобитаемого слоя торфа на нарушенном торфянике при реализации мероприятий по экологической реабилитации или проведении их в год после выбытия из промышленной эксплуатации торфяного месторождения позволит снизить выбросы парниковых газов с участков с преобладанием крапивы двудомной в 2,9–4,7 раз, с преобладанием лугового разнотравья – в 5,5–5,8 раз, с преобладанием ситника развесистого – в 11,8–21,9 раз, а с доминирующим видом канареечник тростниковидный – в 8,1–13,7 раз на первой стадии повторного заболачивания.

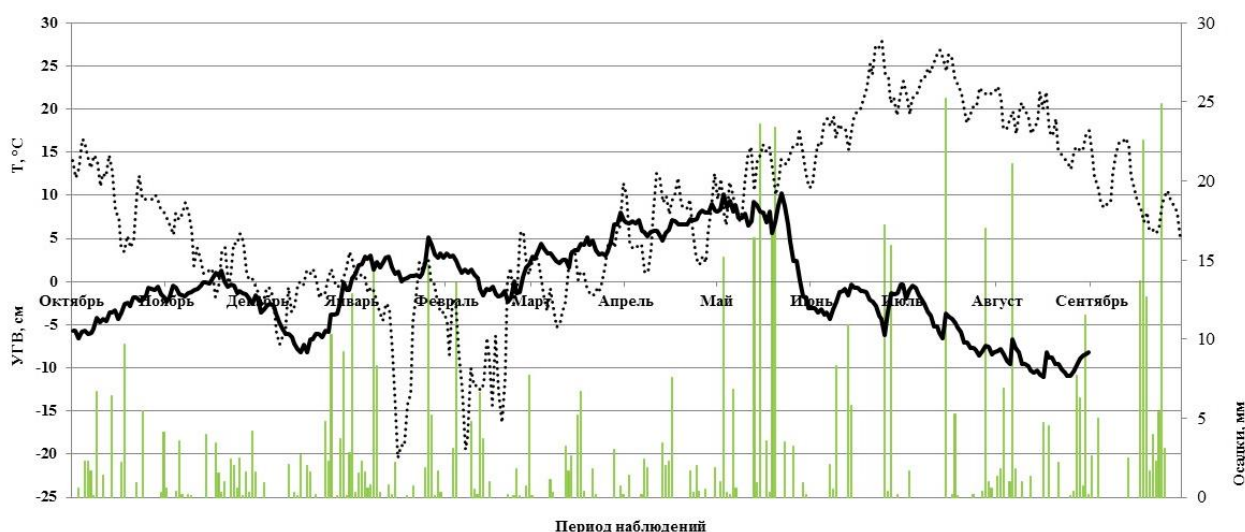


Рисунок 5. – Динамика изменения температуры воздуха, УГВ и осадков торфяного месторождения Ивановское после экологической реабилитации

³ Погода и климат. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/history.php?id=by>.

На второй стадии повторного заболачивания растения, поселяющиеся на восстанавливаемом участке торфяника, вынуждены развивать свою корневую систему во влажном торфяном субстрате в условиях недостаточного (ограниченного) минерального питания. Элементы минерального питания находятся не в свободном виде, а в связанном, представляя собой так называемые органоминеральные соединения, и таким образом они недоступны для восприятия их живыми растениями. Происходит сукцессия растительных ассоциаций, на поверхности торфяника поселяются такие растения, которые в процессе своего развития выработали в себе признаки, позволяющие им развиваться на оставшемся слое торфяной залежи со сформировавшимся водно-воздушным и минеральным режимом питания. Такие растения или не нуждаются в свободном доступе воздуха к их корням, или проводят необходимый корням кислород посредством внутрискелетных и внутрилистных тканей. Многие из них обладают исключительно малой требовательностью к минеральному питанию. Они свободно развиваются на торфяниках, где содержание минеральных солей составляет всего лишь 2–4% от общей массы сухого вещества торфа.

На 4–6 годы после экологической реабилитации (2019–2022 гг.) наблюдались тренды к повышению средних значений УГВ до отметок +1...–4 см (т.е. большую часть года находясь у поверхности земли) и сокращению амплитуды колебаний до 6 см. Также проведенные мероприятия способствовали уменьшению критических низких и высоких значений УГВ в течение всего гидрологического года, деятельный горизонт сократился и составил –12 см. Восстановление гидрологического режима способствовало насыщению пор торфа водой, ОВП составил от –289 до +179 мВ с преобладанием восстановительных процессов; уменьшению минерализации – 97–109 мг/л, незначительному снижению кислотности (5,1–5,8). Данные условия способствовали замещению видового разнообразия болотными фитоценозами, около трех лет заняло замещение или перестроение видового разнообразия. В настоящее время в напочвенном покрове доминируют виды болотной группы, болотно-травянистая растительность на заболоченных и затопленных участках, заросших тростником, рогозом широколистным, осоками, в древесном ярусе – ива в угнетенном состоянии. Каналы начали зарастать подводными растениями и растениями с плавающими корнями (рисунок 6).



Рисунок 6. – Состояние болотных фитоценозов на участке торфяного месторождения низинного типа Ивановское после экологической реабилитации (2022 г.)

Третья стадия восстановления, т.е. стадия восстановления торфообразования. Постоянно высокое содержание влаги в корнеобитаемом слое в течение всего гидрологического года способствует насыщению оставшегося слоя торфа влагой и преобладанию восстановительных процессов, поры торфа заполнены водой и не насыщаются кислородом. Активно происходят анаэробные процессы, при таких условиях отмершие болотные растения не успевают полностью разложиться в течение годового биоцикла, начинается процесс аккумуляции торфа.

В этой анаэробной зоне торф сохраняет свои основные свойства, которые приобрел в торфогенном слое, претерпевает медленные вторичные изменения и превращается в органогенную горную породу. Свидетельством медленных вторичных изменений торфа в зоне консервации является образование метана при участии анаэробных бактерий.

Последняя, т.е. третья стадия восстановления торфяника, переходит в стадию болотообразования и торфо-накопления в условиях пойменного болота. Для изучения этой стадии восстановления необходим более длительный период (20–30 лет) после экологической реабилитации.

Заключение. На нулевой стадии своего существования, т.е. после выбытия из промышленной эксплуатации, исследуемый участок длительное время находился в осушенном состоянии, на режим грунтовых вод исследуемого участка существенно повлияла гидротехническая мелиорация. Большую часть года грунтовые воды располагались на уровне –60 см. Эти условия не способствовали зарастанию болотными фитоценозами, происходила минерализация торфа, и, как следствие, выбросы парниковых газов составляли 10,1 т CO₂-экв./га в год.

На основании проведенных исследований торфяного месторождения низинного типа до и после экологической реабилитации можно утверждать, что процесс повторного заболачивания проходит три стадии:

– *первая стадия (повторного увлажнения)* – избыточное накопление влаги в поверхностном остаточном слое торфяной залежи за счет увеличения средних годовых значений УГВ с –58 до –21 см, уменьшение амплитуды колебаний с 18 до 11 см и минимальных значений с –104 до –53 см, смена окислительных процессов на восстановительные, что привело к отмиранию сухолюбивой растительности;

– *вторая стадия (болотообразования)* – процесс восстановления основных параметров УГВ, и, как следствие, зарастание открытых участков торфа болотными фитоценозами, сукцессия фитоценозов на заросших участках за счет установившегося режима УГВ: средние –2 см, амплитуда колебаний 7 см, минимум –12 см, преобладание восстановительных процессов;

– *третья стадия (восстановления торфообразования)* – начинается на четвертом году после экологической реабилитации, происходит коренное изменение основных условий среды, важнейших жизненных режимов растений, преобладают восстановительные процессы, исследуемый участок полностью покрывается болотными фитоценозами.

Мероприятия экологической реабилитации исследуемого участка торфяного месторождения Ивановское способствовали повышению среднегодовых значений уровней грунтовых вод до уровня поверхности земли, восстановлению видового разнообразия болотных фитоценозов (в настоящее время преобладают тростниково-осоковые фитоценозы), сокращению выбросов парниковых газов в 2,4 раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ратникова О.Н. Гидрологический режим торфяных месторождений разной категории нарушенности // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф. Стр-во. Прикладные науки. – 2018. – № 8. – С. 225–231.
2. Матвеев А.В. Гурский Б.Н., Левицкая Р.И. Рельеф Белоруссии. – Минск: Университетское, 1988. – 320 с.
3. Emission reductions from rewetting of peatlands. Towards a field guide for the assessment of greenhouse gas emissions from Central European peatlands / J. Couwenberg, J. Augustin, D. Michaelis et al. – Greifswald: Greifswald University, 2008. – 27 p.
4. Tanneberger F., Wichtman W. Carbon credits from peatland rewetting. Climate – biodiversity – land use. – Stuttgart: Schweizerbart Science Publishers, 2011. – 224 p.
5. Assessing greenhouse gas emissions from peatlands using vegetation as a proxy / J. Couwenberg, A. Thiele, F. Tanneberger et al. // Hydrobiologia. – 2011. – № 674. – P. 67–89. DOI: 10.1007/s10750-011-0729-x.
6. Handbook for assessment of greenhouse gas emissions from peatlands. Applications of direct and indirect methods by LIFE Peat Restore / L. Jarašius, J. Etzold, L. Truus et al. – Vilnius: Lithuanian Fund for Nature, 2022. – 201 p. – URL: https://www.researchgate.net/publication/359746229_Handbook_for_assessment_of_greenhouse_gas_emissions_from_peatlands_Applications_of_direct_and_indirect_methods_by_LIFE_Peat_Restore (дата обращения: 28.01.2025).
7. Ярмошук Т.Д. Эмиссия парниковых газов с торфяного месторождения Выгонощанское на участке с преобладанием крапивы двудомной // Природопользование. – 2023. – № 2. – С. 39–54.
8. Ярмошук Т.Д., Ракович В.А. Эмиссии диоксида углерода при имитации повторного заболачивания выработанного торфяного месторождения низинного типа с доминирующим видом *Urtica dioica* // Природные ресурсы. – 2013. – № 2. – С. 5–10.

REFERENCES

1. Ratnikova, O.N. (2018). Hidrologicheskii rezhim torfyanikh mestorozhdenii raznoi kategorii narushennosti [Hydrological regime of peat deposits of different category of disorder]. *Vestn. Polotsk. gos. un-ta. Ser. F, Str-vo. Prikladnye nauki [Herald of Polotsk State University. Series F. Civil Engineering. Applied Sciences]*, (8), 225–231. (In Russ., abstr. in Engl.).
2. Matveev, A.V., Gurskii, B.N. & Levitskaya, R.I. (1988). *Rel'ef Belorussii*. Minsk: Universitetskoe. (In Russ.).
3. Couwenberg, J., Augustin, J., Michaelis, D. & Joosten, H. (2008). *Emission reductions from rewetting of peatlands. Towards a field guide for the assessment of greenhouse gas emissions from Central European peatlands*. Greifswald: Greifswald University, 2008.
4. Tanneberger, F. & Wichtman, W. (2011). *Carbon credits from peatland rewetting. Climate – biodiversity – land use*. Stuttgart: Schweizerbart Science Publishers.
5. Couwenberg, J., Thiele, A., Tanneberger, F., Augustin J., Bärtsch, S., Dubovik, D., ... Joosten, H. (2011). Assessing greenhouse gas emissions from peatlands using vegetation as a proxy. *Hydrobiologia*, (674), 67–89. DOI: 10.1007/s10750-011-0729-x.
6. Jarašius, L., Etzold, J., Truus, L., Purre, A.-H., Sendžikaite, J., Strazdina, L., ... Jurema, L. (2022). *Handbook for assessment of greenhouse gas emissions from peatlands. Applications of direct and indirect methods by LIFE Peat Restore*. Vilnius: Lithuanian Fund for Nature. URL: https://www.researchgate.net/publication/359746229_Handbook_for_assessment_of_greenhouse_gas_emissions_from_peatlands_Applications_of_direct_and_indirect_methods_by_LIFE_Peat_Restore.

7. Yarmoshuk, T.D. (2023). Emissiya parnikovykh gazov s torfyanogo mestorozhdeniya Vygonoshchanskoe na uchastke s preobladaniem krapivy dvudomnoi [Greenhouse gas emission from the Vygonoshchanskoe peat deposit at the site with a predominance of dioecious nettle]. *Prirodopol'zovanie [Nature Management]*, (2), 39–54. (In Russ., abstr. in Engl.).
8. Yarmoshuk, T.D. & Rakovich, V.A. (2013). Emissii dioksida ugleroda pri imitatsii povtornogo zabolachivaniya vyrabotannogo torfyanogo mestorozhdeniya nizinnogo tipa s dominiruyushchim vidom *Urtica dioica* [Carbon dioxide emissions during simulation of repeated waterlogging of a depleted fen peat deposit with the dominant species *Urtica dioica*]. *Prirodnye resursy [Natural resources]*, (2), 5–10. (In Russ., abstr. in Engl.).

Поступила 03.02.2025

STAGES OF REWETTING IN THE PEAT EXTRACTED AREA OF THE IVANOVSKOYE FEN PEAT DEPOSIT

O. RATNIKOVA, V. RAKOVICH, T. YARMOSHUK, I. LISITSYNA, A. BORSH
(*Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk*)

The article was discussed the main stages of rewetting of the cut-away Ivanovskoye fen peat deposit based on eight years of observations. Analysis of the main parameters of groundwater levels (high, average, low annual and monthly values of groundwater levels and amplitude of fluctuations, as well as the course of the curve relative to the earth's surface), values of redox potential, total mineralization, acidity, succession of vegetation and greenhouse gas emissions (CO₂-eq.) allowed us to conclude that the peatland undergoes three stages of restoration after the implementation of environmental rehabilitation measures. The measures were contributed to an increase in the average annual values of groundwater levels to the level of the earth's surface, the restoration of the species diversity of fen phytocenoses (currently reed-sedge phytocenoses predominate) and a 2.4-fold reduction in greenhouse gas emissions.

Keywords: cut-away peatland area, environmental rehabilitation measures, groundwater levels, greenhouse gas emissions, stages of ineffectively draining.

УДК 502/504:556.5(043)

DOI 10.52928/2070-1683-2025-40-1-67-75

ЭМИССИИ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА И МЕТАНА ПРИ ИМИТАЦИОННОМ ЗАБОЛАЧИВАНИИ НИЗИННОГО ТОРФЯНИКА С РАЗЛИЧНЫМ СОСТАВОМ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА

Т.Д. ЯРМОШУК, канд. техн. наук, доц. В.А. РАКОВИЧ
(Институт природопользования НАН Беларуси, Минск)

В настоящее время экологическая реабилитация выбывших из промышленной эксплуатации торфяных месторождений рекомендована на законодательном уровне для всех субъектов хозяйствования. Однако в первый год после повторного заболачивания наблюдаются повышенные выбросы таких парниковых газов, как диоксид углерода и метан вследствие гниения и разложения суходольной растительности. В связи с этим в лабораторных условиях выполнен ряд экспериментов по определению вклада в потоки парниковых газов вследствие разложения лугового разнотравья, ситника развесистого и канареечника тростниковидного. Установлено, что удаление верхнего корнеобитаемого слоя торфа при реализации мероприятий по экологической реабилитации торфяника с преобладанием лугового разнотравья снизит выбросы парниковых газов в 5,5–5,8 раз, с преобладанием ситника развесистого – в 11,8–21,9 раз, а с доминирующим видом канареечник тростниковидный – в 8,1–13,7 раз.

Ключевые слова: парниковые газы, метан, диоксид углерода, торфяник, экологическая реабилитация, луговое разнотравье, ситник развесистый, канареечник тростниковидный.

Введение. Законом Республики Беларусь № 272-3 «Об охране и использовании торфяников»¹ устанавливаются правовые основы охраны и использования торфяников в целях сохранения и восстановления биосферных функций болот, что обусловлено международным значением водно-болотных угодий Беларуси. В Резолюции 4/16 «Сохранение и рациональное регулирование торфяников», принятой Ассамблеей ООН по окружающей среде, отмечается ценность совершенствования регулирования торфяников с целью повышения их потенциала по удержанию углерода на деградировавших участках.

Для объектов добычи торфа на стадии разработки предпроектной (прединвестиционной) документации предусматриваются мероприятия по рекультивации земель², направленные на использование выработанных торфяных месторождений (их участков) преимущественно в природоохранных целях. Соответственно, экологическая реабилитация нарушенных торфяников рекомендована для субъектов хозяйствования на законодательном уровне.

Установлено [1–4], что повторное заболачивание выбывших из промышленной эксплуатации торфяников является перспективным способом снижения эмиссий парниковых газов. Однако в первые годы после данного мероприятия вследствие разложения органических веществ погибших суходольных растений наблюдаются высокие эмиссии парниковых газов [3; 5–7]. В связи с этим крайне важно планировать деятельность, предшествующую повторному заболачиванию, с целью минимизации выбросов метана и диоксида углерода. Для того чтобы понять, какие эмиссии парниковых газов вернутся в атмосферу сразу после повторного заболачивания неэффективно используемого в хозяйственной деятельности выработанного торфяного месторождения, в лабораторных условиях выполнены эксперименты, имитирующие данный процесс.

Основная часть. Цель исследования – сравнительный анализ эмиссий диоксида углерода (CO₂) и метана (CH₄) при имитационном заболачивании вегетативных частей: 1) лугового разнотравья (timoфеевка луговая (*Phleum pratense*), мятлик луговой (*Poa pratensis*), пырей ползучий (*Elytrigia repens*)); 2) ситника развесистого (*Juncus Effusus*), 3) канареечника тростниковидного (*Phalaris arudinacea*), их композиций с торфом; а также торфа, отобранного с глубины 30–40 см.

Так, в лабораторных условиях выполнен ряд экспериментов по имитационному заболачиванию биомассы указанных растений и их композиций с торфом. В качестве методологической основы использовали Патент Республики Беларусь № 20512 «Способ отбора проб парниковых газов при моделировании повторного заболачивания выработанных торфяных месторождений в лабораторных условиях»³ с некоторой модификацией. Анализ парниковых газов осуществляли ультрапортативным газовым анализатором (UGGA, модель 915-0011), принцип работы которого основан на внутривибрационной абсорбционной лазерной спектроскопии. Образцы помещались в 27 труб из ПВХ диаметром 160 мм и длиной 500 мм, один конец которых наглухо закрывался пластиковой заглушкой.

Перед закладкой лабораторного эксперимента в трехкратной повторности определяли количество углерода (C) и азота (N) образцов торфа и биомассы методом элементного микроанализа, а также влажность образцов. Чтобы не нарушать естественной природной структуры и состава субстратов, для имитационного эксперимента закладывали свежую биомассу и торф, показатели влажности использовались только для расчета углерода и азота в композиции. Результаты анализа представлены в таблице 1.

¹ Закон Республики Беларусь от 18 декабря 2019 г. № 272-3 «Об охране и использовании торфяников». URL: <https://etalonline.by/document/?regnum=h11900272>.

² См. сноску 1.

³ BY 20512 C1 2016. Способ отбора проб парниковых газов при моделировании повторного заболачивания выработанных торфяных месторождений в лабораторных условиях.

Таблица 1. – Значение C/N анализа и влажности субстратов композиций

Наименование композиции		C/N	N, %	C, %	W, %
Канареечник тростниковидный	Зеленая часть	34,87±2,43*	1,36±0,11	47,43±0,68	2,8
	Корни	36,37±5,31	1,41±0,19	50,49±0,38	1,7
	Прикорневой торф	17,12±0,27	2,55±0,03	43,60±0,33	81,3
	Торф с глубины 30–40 см	16,28±0,93	2,51±0,14	40,77±0,12	82,3
Ситник развесистый	Зеленая часть	27,71±0,50	1,70±0,03	47,21±0,37	2,3
	Корни	24,48±1,34	1,88±0,09	46,69±0,78	4,2
	Прикорневой торф	12,00±0,15	3,66±0,03	43,93±0,14	68,9
	Торф с глубины 30–40 см	12,85±0,54	3,48±0,11	45,89±2,23	71,1
Луговое разнотравье	Зеленая часть	14,23±0,61	3,27±0,13	46,53±0,19	16,9
	Корни	14,91±0,41	3,12±0,06	46,51±0,41	4,7
	Прикорневой торф	12,27±0,37	3,53±0,14	43,37±0,34	64,9
	Торф с глубины 30–40 см	11,82±0,06	3,67±0,02	43,40±0,18	69,1

Примечание. * ± – стандартное отклонение.

Как показывают данные таблицы 1, высокой влажностью обладал торф со всех исследуемых территорий, наиболее высокая влажность характерна для торфа, отобранного с переувлажненного участка торфяного месторождения с преобладанием канареечника тростниковидного. Растительные субстраты были с невысокой влажностью. Важным генетическим признаком торфяной почвы является соотношение углерода и азота, которое снижается по мере окультуривания торфяника. Соответственно, чем меньше соотношение C/N, тем более богаты питательными веществами торф и растительные субстраты. Наименьшее количество азота содержалось в растительной биомассе ситника и канареечника. Наиболее богаты углеродом корни канареечника.

В таблице 2 показан состав композиций, указаны их условные обозначения, также показан пересчет на углерод и азот по абсолютно сухому весу. Указанные в таблице 2 субстраты помещали в подготовленные трубы и заливали дистиллированной водой так, чтобы выше поверхности воды оставалось 20 см воздуха. При этом композиции были полностью покрыты водой. Измерения парниковых газов выполняли в течение первых 100 дней имитационного заболачивания ежедневно, и далее до конца календарного года – раз в 2–5 дней. На рисунках 1–6 представлены графики годовых эмиссий диоксида углерода и метана при имитационном заболачивании различных фитоценозов.

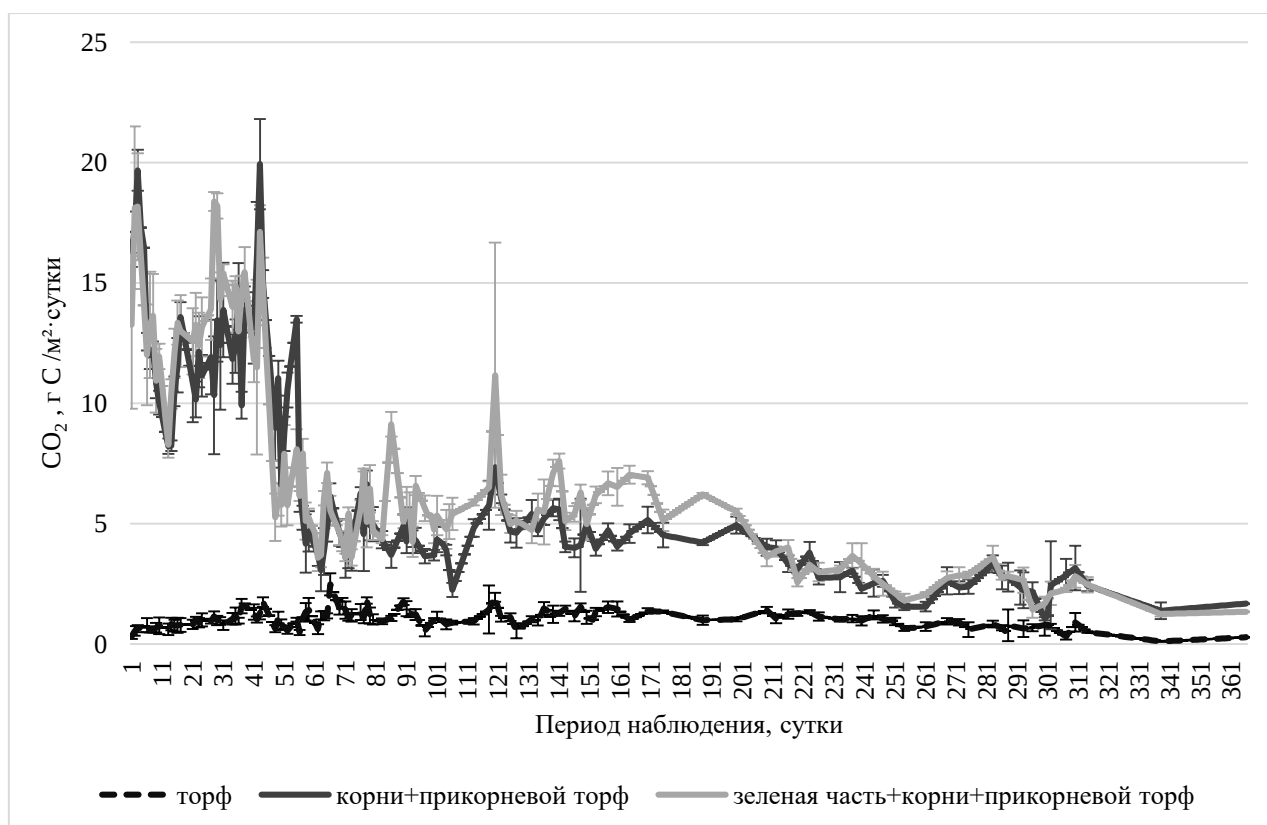
Рисунок 1. – Динамика потоков CO₂ за год эксперимента при имитационном заболачивании лугового разнотравья



Рисунок 2. – Динамика потоков CO_2 за год эксперимента при имитационном заболачивании ситника развесистого

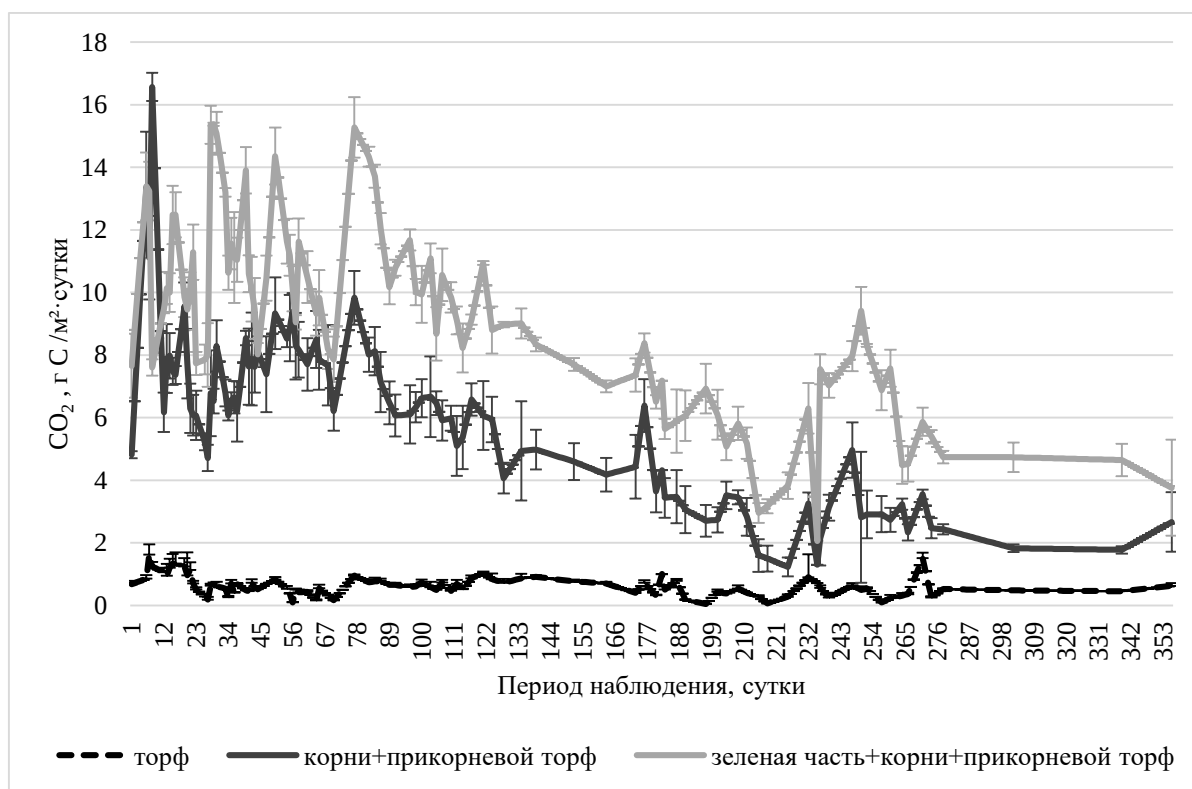


Рисунок 3. – Динамика потоков CO_2 за год эксперимента при имитационном заболачивании канареечника тростниковидного

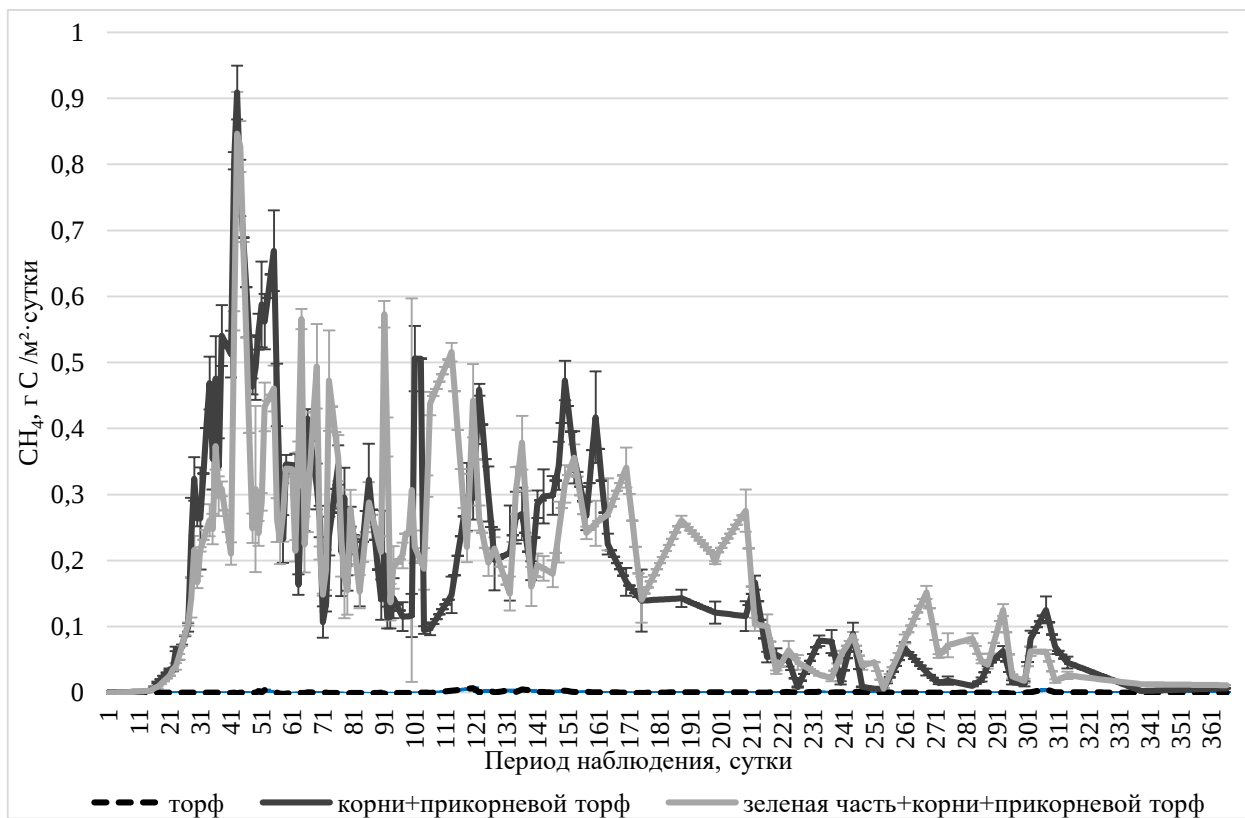


Рисунок 4. – Динамика потоков CH_4 за год эксперимента при имитационном заболачивании лугового разнотравья

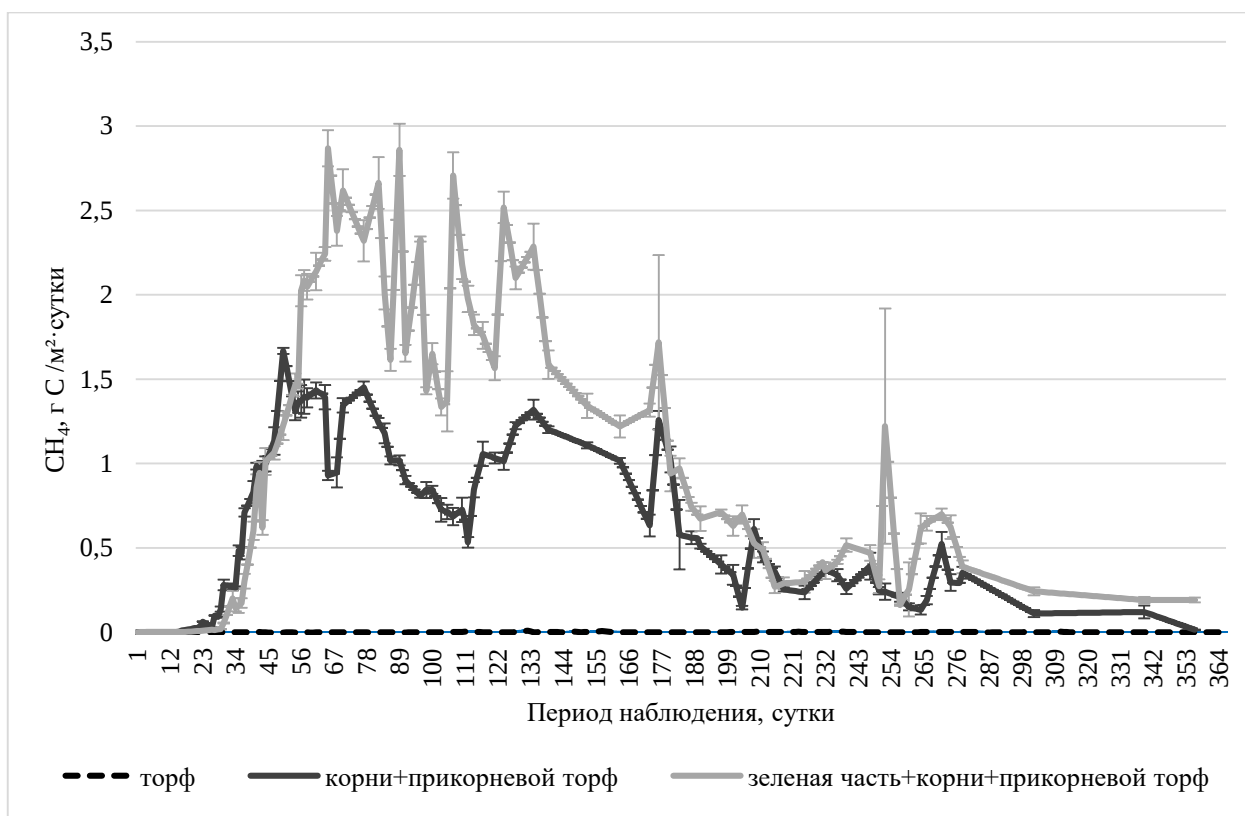


Рисунок 5. – Динамика потоков CH_4 за год эксперимента при имитационном заболачивании ситника развесистого

Таблица 2. – Состав композиций для лабораторного эксперимента, содержание углерода и азота в каждой композиции низинного торфяника

№ группы	Обозначение места отбора субстратов	Наименование субстрата	Состав композиции, г			Абсолютно сухой вес композиции, г			Содержание углерода в субстратах, г				Содержание азота в субстратах, г			
			торф	зел. ч.	корни	торф	зел. ч.	корни	торф	зел. ч.	корни	Всего С в грубе	торф	зел. ч.	корни	Всего N в грубе
1	Луговое разнотравье	Торф с глубины 30–40 см	1451,5	–	–	448,5	–	–	194,6	–	–	194,6	16,5	–	–	16,5
2			1675	–	–	517,6	–	–	224,6	–	–	224,6	19,0	–	–	19,0
3			1803,8	–	–	557,4	–	–	241,9	–	–	241,9	20,5	–	–	20,5
4		Корни + прикорневой торф	1058,6	–	100,5	371,6	–	95,8	161,2	–	44,5	205,7	13,1	–	3,0	16,1
5			1155,1	–	81,4	405,4	–	77,6	175,9	–	36,1	211,9	14,3	–	2,4	16,7
6		Зеленая часть + корни + прикорневой торф	1155	–	80,7	405,4	–	76,9	175,8	–	35,8	211,6	14,3	–	2,4	16,7
7			771	32,5	44,4	270,6	27,0	42,3	117,4	12,6	19,7	149,6	9,6	0,9	1,3	11,8
8	Ситник развесистый	Зеленая часть + корни + прикорневой торф	789,8	26,5	46,1	277,2	22,0	43,9	120,2	10,2	20,4	150,9	9,8	0,7	1,4	11,9
9			768,9	42,3	50,6	269,9	35,2	48,2	117,1	16,4	22,4	155,8	9,5	1,2	1,5	12,2
10		Торф с глубины 30–40 см	1656,9	–	–	478,8	–	–	219,8	–	–	219,8	16,7	–	–	16,7
11			1609,9	–	–	465,3	–	–	213,5	–	–	213,5	16,2	–	–	16,2
12			1633,5	–	–	472,1	–	–	216,7	–	–	216,7	16,4	–	–	16,4
13			661,4	–	105,7	205,7	–	101,3	90,4	–	47,3	137,7	7,5	–	1,9	9,4
14			585,8	–	125,5	182,2	–	120,2	80,0	–	56,1	136,2	6,7	–	2,3	8,9
15			565,8	–	112,6	176,0	–	107,9	77,3	–	50,4	127,7	6,4	–	2,0	8,5
16		Зеленая часть + корни + прикорневой торф	759,6	80,3	64,8	236,2	78,5	62,1	103,8	37,0	29,0	169,8	8,6	1,3	1,2	11,2
17			830	117,3	71,9	258,1	114,6	68,9	113,4	54,1	32,2	199,7	9,4	2,0	1,3	12,7
18			821	89	76	255,3	87,0	72,8	112,2	41,1	34,0	187,2	9,3	1,5	1,4	12,2
19	Канареечник тростниково-видный	Торф с глубины 30–40 см	1683,7	–	–	298,0	–	–	121,5	–	–	121,5	7,5	–	–	7,5
20			1814,1	–	–	321,1	–	–	130,9	–	–	130,9	8,1	–	–	8,1
21			1958,7	–	–	346,7	–	–	141,3	–	–	141,3	8,7	–	–	8,7
22		Корни + прикорневой торф	568,6	–	83,1	106,3	–	81,7	46,4	–	41,2	87,6	2,7	–	1,1	3,9
23			369	–	87,8	69,0	–	86,3	30,1	–	43,6	73,7	1,8	–	1,2	3,0
24		Зеленая часть + корни + прикорневой торф	562,2	–	77,5	105,1	–	76,2	45,8	–	38,5	84,3	2,7	–	1,1	3,7
25			663,7	60,4	24,6	124,1	58,7	24,2	54,1	27,8	12,2	94,2	3,2	0,8	0,3	4,3
26			652,8	80,6	23,7	122,1	78,3	23,3	53,2	37,2	11,8	102,1	3,1	1,1	0,3	4,5
27			823,9	94,1	21,9	154,1	91,5	21,5	67,2	43,4	10,9	121,4	3,9	1,2	0,3	5,5

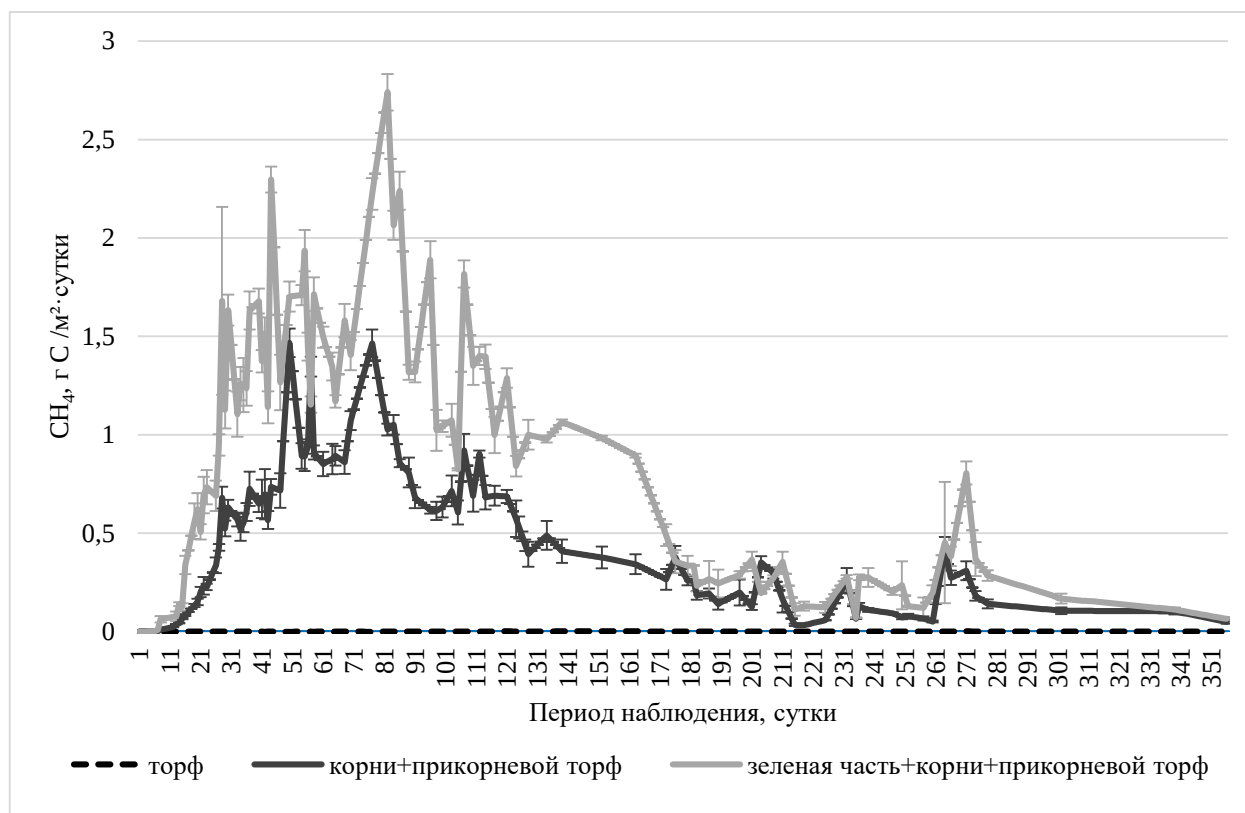


Рисунок 6. – Динамика потоков CH_4 за год эксперимента при имитационном заболачивании канареечника тростниковидного

В эксперименте в лабораторных условиях за 30 суток имитационного заболачивания оценено от 7,2 до 24,3% от всего количества $\text{CO}_2\text{-C}$, выделившегося за год. При этом в композициях с луговым разнотравьем и ситником развесистым наблюдалось более интенсивное выделение диоксида углерода в составах с растительным биоматериалом. К концу второго и четвертого месяца имитационного заболачивания композиций доля диоксида углерода составила соответственно 16,9–40,6 и 38,2–58,7% от суммарного его количества за год. За шесть месяцев от начала лабораторного эксперимента около трех четвертей от всей годовой продукции $\text{CO}_2\text{-C}$ выделилось из композиций с растительной биомассой, суммарные выбросы диоксида углерода из образцов торфа без растений происходили медленнее, распределяясь равномерно на весь год.

При имитационном заболачивании торфа без растительности во всех трех вариациях наблюдалось поглощение метана в результате деятельности метанотрофных микроорганизмов в течение 2–6 месяцев. При этом при заболачивании торфа под луговым разнотравьем после 2 месяцев обводнения наблюдалось дальнейшее равномерное повышение эмиссий метана. При обводнении торфа, отобранного под ситником и канареечником, наблюдалось выделение метана, а уже после 10 месяцев имитационного заболачивания наблюдалось поглощение метана. В композициях с растительным материалом после первого месяца эксперимента наблюдались минимальные эмиссии метана (от 0,1 до 5,8%), что связано с пока еще преобладанием аэробных микроорганизмов над анаэробными, но уже после 4 месяцев отмечены выбросы метана более 50% практически по всем композициям с растительными остатками. Такое замедленное начало метаногенной активности, а также незначительные выбросы CH_4 из торфа без растительности можно объяснить конкуренцией за органические субстраты с железом- или сульфатредуцентами [5; 8]. Более трех четвертей от всех годовых выбросов метана отмечено по всем композициям с растительным биоматериалом после 6 месяцев обводнения, к 8 месяцу эмиссии метана в композициях с растительным биоматериалом приблизились к 90%. На более поздних стадиях разложения темпы выделения $\text{CH}_4\text{-C}$ были незначительными.

На рисунках 1–6 отмечается резкое увеличение концентрации диоксида углерода в начале искусственного заболачивания субстратов, содержащих растительную биомассу. Подобная картина наблюдалась и в лабораторных условиях с *Urtica dioica* [6], это объясняется преобладанием аэробных микроорганизмов над анаэробными. Аэробное производство CO_2 является индикатором мгновенно доступных органических субстратов из торфа и свежей органической биомассы в широком диапазоне веществ [5]. В течение всего периода эксперимента выбросы CO_2 постепенно сокращались, наиболее быстро снизились выбросы CO_2 в композициях с ситником развесистым (см. рисунок 2).

Разложение органического вещества и последующее образование парниковых газов также может быть ингибировано присутствием органических акцепторов электронов в гуминовых веществах [9], этим можно объяснить в некоторой степени повышенные выбросы CO_2 и CH_4 в композициях «зеленая часть+корни+прикорневой торф» на фоне сравнительно низкой массы растительного биоматериала в композициях. Помимо этого, прикорневой торф содержал остаточный материал растительного происхождения (например, в результате отложения корневища), который не был полностью удален до имитационного заболачивания, и процессы микробной деятельности с выделением CO_2 протекали более активно по сравнению с торфом с глубины 30–40 см. Это предположение согласуется с результатами исследования [10], в котором сообщалось о том, что уровень образования CO_2 и CH_4 был, как правило, самым высоким в поверхностном торфе, где образовался прочный растительный покров, а содержание свежего или слегка разложившегося растительного опада было самым высоким.

Эмиссии метана в начале имитационного заболачивания во всех композициях отсутствовали, что объясняется преобладанием в субстратах аэробных организмов над анаэробными. Уже с 11–20 суток отмечено несущественное увеличение эмиссий метана вследствие развития метаногенных микроорганизмов, достигая своего пика на 40–90 сутки обводнения. После этого эмиссии метана постепенно сокращались в результате снижения объема легкодоступных питательных веществ, а также заселения метанотрофов.

В таблице 3 представлены суммарные значения эмиссий диоксида углерода и метана при моделировании имитационного заболачивания низинного торфяника с преобладанием лугового разнотравья, ситника развесистого и канареечника тростниковидного.

Таблица 3. – Суммарные эмиссии диоксида углерода и метана по всем композициям и потери углерода вследствие эмиссий парниковых газов

Искомый параметр	Луговое разнотравье			Ситник развесистый			Канареечник тростниковидный		
	Торф с глубины 30–40 см	Корни + прикорневой торф	Зеленая часть + корни + прикорневой торф	Торф с глубины 30–40 см	Корни + прикорневой торф	Зеленая часть + корни + прикорневой торф	Торф с глубины 30–40 см	Корни + прикорневой торф	Зеленая часть + корни + прикорневой торф
$\text{CO}_2\text{-C}$, г/м ² ·год	339,255±* 23,786	1748,208± 81,128	1937,427± 88,158	189,100± 6,073	2149,923± 70,505	4012,373± 169,215	205,070± 9,717	1617,309± 65,779	2707,595± 54,569
$\text{CH}_4\text{-C}$, г/м ² ·год	0,125± 0,025	55,499± 2,696	59,608± 2,630	0,020± 0,014	202,677± 3,328	323,554± 6,022	0,015± 0,007	128,929± 3,854	242,898± 5,849
Среднее содержание С в композиции, г, в том числе растительной биомассы, г	220,377	209,746	152,128	216,645	133,835	185,571	131,242	81,858	105,916
	0	38,796	33,903	0	51,263	75,782	0	41,098	47,746
Суммарные потери С, г/м ² ·год	339,380	1803,707	1997,035	189,12	2541,720	4335,927	205,085	1746,238	2950,493
Общие выбросы в $\text{CO}_2\text{-экв.}$, т/га в год, из них метана $\text{CO}_2\text{-экв.}$, т/га в год	12,441	64,841	71,834	6,934	81,533	151,434	7,519	61,020	102,517
	0,002	0,740	0,795	0	2,702	4,314	0,000	1,719	3,239

Примечание. * ± – стандартное отклонение.

Закключение. Исследования показали, что присутствие растительной биомассы увеличивает выбросы CO_2 и CH_4 для лугового разнотравья в 6 раз, ситника развесистого – в 17 раз, канареечника тростниковидного – в 11 раз. Напротив, в образцах только с торфом не наблюдалось значительных выбросов парниковых газов из-за отсутствия легкоразлагающегося вещества. На заболачиваемых участках торфяников происходит образование CO_2 и CH_4 при наличии некоторого количества лабильного органического вещества, например, в результате ризоотложений или опада.

Лабораторные эксперименты не считаются подходящими для оценки фактического значения источника или поглотителя CO_2 и CH_4 с торфяников [5], их можно использовать в качестве индикатора потенциала образования CO_2 и CH_4 в определенном субстрате при планировании мероприятий по повторному заболачиванию выбывших из промышленной эксплуатации торфяных месторождений.

На поверхности торфяников при их длительном нахождении в осушенном и заброшенном состоянии происходит существенное зарастание территории сухолюбивой растительностью, которая при повторном обводнении обладает чрезвычайно высоким потенциалом образования CO_2 и CH_4 . Риск высоких выбросов CO_2 и CH_4 после экологической реабилитации торфяных месторождений обуславливается высокими уровнями грунтовых вод и наличием обводненной растительности. В легкоразлагаемом и богатом питательными веществами субстрате активно проходят процессы микробного разложения.

Удаление верхнего корнеобитаемого слоя торфа перед экологической реабилитацией позволит сократить выбросы диоксида углерода и метана, что актуально в связи с взятыми обязательствами Республики Беларусь по достижению углеродной нейтральности к 2050 году.

ЛИТЕРАТУРА

1. Assessing greenhouse gas emissions from peatlands using vegetation as a proxy / J. Couwenberg, A. Thiele, F. Tanneberger et al. // *Hydrobiologia*. – 2011. – № 674. – P. 67–89. DOI: 10.1007/s10750-011-0729-x.
2. The unexpected long period of elevated CH_4 emissions from an inundated fen meadow ended only with the occurrence of cattail (*Typha latifolia*) / D. Antonijević, M. Hoffmann, A. Prochnow et al. // *Global Change Biology*. – 2023. – Vol. 29, № 13. – P. 3678–3691. DOI: 10.1111/gcb.16713.
3. An optimized water table depth detected for mitigating global warming potential of greenhouse gas emissions in wetland of Qinghai-Tibetan Plateau / J. Zhang, H. Chen, M. Wang et al. // *iScience*. – 2024. – Vol. 27, № 2. DOI: 10.1016/j.isci.2024.108856.
4. Углеродные кредиты и заболачивание деградированных торфяников / Редкол.: Ф. Таннебергер, В. Вихтманн. – Штутгарт: Schweizerbart Science Publishers, 2011. – 223 с.
5. Organic sediment formed during inundation of a degraded fen grassland emits large fluxes of CH_4 and CO_2 / M. Hahn-Schöfl, D. Zak, M. Minke et al. // *Biogeosciences*. – 2011. – Vol. 8, № 6. – P. 1539–1550. DOI: 10.5194/bg-8-1539-2011.
6. Ярмошук Т.Д., Ракович В.А. Эмиссии диоксида углерода при имитации повторного заболачивания выработанного торфяного месторождения низинного типа с доминирующим видом *Urtica dioica* // *Природные ресурсы*. – 2013. – № 2. – С. 5–10.
7. Определение эмиссий парниковых газов при имитационном моделировании повторного заболачивания выработанных торфяных месторождений / Т.Д. Ярмошук, М. Минке, В.А. Ракович и др. // *Природопользование*. – 2013. – Вып. 23. – С. 39–47.
8. Peat bog restoration by floating raft formation: the effects of groundwater and peat quality / A.J.P. Smolders, H.B.M. Tomassen, L.P.M. Lamers et al. // *Journal of Applied Ecology*. – 2002. – Vol. 39, № 3. – P. 391–401. DOI: 10.1046/j.1365-2664.2002.00724.x.
9. Blodau C. Carbon cycling in peatlands – a review of processes and controls // *Environmental Reviews*. – 2002. – Vol. 10, № 2. – P. 111–134. DOI: 10.1139/a02-004.
10. Glatzel S., Basiliko N., Moore T. Carbon dioxide and methane production potentials of peats from natural, harvested and restored sites // *Wetlands*. – 2004. – Vol. 24, № 2. – P. 261–267. URL: https://geog.mcgill.ca/faculty/moore/Wetlands_24_261.pdf.

REFERENCES

1. Couwenberg, J., Thiele, A., Tanneberger, F., Augustin J., Bärish, S., Dubovik, D., ... Joosten, H. (2011). Assessing greenhouse gas emissions from peatlands using vegetation as a proxy. *Hydrobiologia*, (674), 67–89. DOI: 10.1007/s10750-011-0729-x.
2. Antonijević, D., Hoffmann, M., Prochnow, A., Krabbe, K., Weituschat, M., Couwenberg, J., ... Augustin, J. (2023). The unexpected long period of elevated CH_4 emissions from an inundated fen meadow ended only with the occurrence of cattail (*Typha latifolia*). *Global Change Biology*, 29(13), 3678–3691. DOI: 10.1111/gcb.16713.
3. Zhang, J., Chen, H., Wang, M., Liu, X., Peng, C., Wang, L., ... Zhu, Q. (2024). An optimized water table depth detected for mitigating global warming potential of greenhouse gas emissions in wetland of Qinghai-Tibetan Plateau. *iScience*, 27(2). DOI: 10.1016/j.isci.2024.108856.
4. Tanneberger, F. (Eds.) & Vikhtmann, V. (Eds.) (2011). *Uglerodnye kredity i zabolachivanie degradirovannykh torfyanikov*. Shtuttgart: Schweizerbart Science Publishers. (In Russ.).
5. Hahn-Schöfl, M., Zak, D., Minke, M., Gelbrecht, J., Augustin, J. & Freibauer, A. (2011). Organic sediment formed during inundation of a degraded fen grassland emits large fluxes of CH_4 and CO_2 . *Biogeosciences*, 8(6), 1539–1550. DOI: 10.5194/bg-8-1539-2011.
6. Yarmoshuk, T.D. & Rakovich, V.A. (2013). Emissii dioksida ugleroda pri imitatsii povtornogo zabolachivaniya vyrabotannogo torfyanogo mestorozhdeniya nizinnogo tipa s dominiruyushchim vidom *Urtica dioica* [Carbon dioxide emissions during simulation of repeated waterlogging of a depleted fen peat deposit with the dominant species *Urtica dioica*]. *Prirodnye resursy* [Natural resources], (2), 5–10. (In Russ., abstr. in Engl.).
7. Yarmoshuk, T.D., Minke, M., Rakovich, V.A., Avgustin, Y., Tile, A., Tikhonov, V.G. & Chuvashova, A.A. (2013) Opredelenie emissii parnikovyykh gazov pri imitatsionnom modelirovanii povtornogo zabolachivaniya vyrabotannykh torfyanikh mestorozhdenii [Estimation of emission of greenhouse gases at imitated modeling of re-wetting of degraded peatlands]. *Prirodopol'zovanie* [Nature Management], (23), 39–47. (In Russ., abstr. in Engl.).
8. Smolders, A.J.P., Tomassen, H.B.M., Lamers, L.P.M., Lomans, B.P. & Roelofs, J.G.M. (2002). Peat bog restoration by floating raft formation: the effects of groundwater and peat quality. *Journal of Applied Ecology*, 39(3), 391–401. DOI: 10.1046/j.1365-2664.2002.00724.x.
9. Blodau, C. (2002). Carbon cycling in peatlands – a review of processes and controls. *Environmental Reviews*, 10(2), 111–134. DOI: 10.1139/a02-004.
10. Glatzel, S., Basiliko, N. & Moore, T. (2004). Carbon dioxide and methane production potentials of peats from natural, harvested and restored sites. *Wetlands*, 24(2), 261–267. URL: https://geog.mcgill.ca/faculty/moore/Wetlands_24_261.pdf.

Поступила 10.07.2024

CARBON DIOXIDE AND METHANE EMISSIONS FROM SIMULATED REWETTING OF FEN PEATLAND WITH DIFFERENT COMPOSITION OF VEGETATION COVER**T. YARMOSHUK, V. RAKOVICH*****(Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk)***

Currently, environmental rehabilitation of peat deposits that have been retired from commercial operation is recommended at the legislative level for all business entities. However, in the first year after rewetting, increased emissions of greenhouse gases such as carbon dioxide and methane are observed due to rotting and decomposition of waterless valley vegetation. In this regard, a number of experiments were performed in the laboratory to determine the contribution to greenhouse gas fluxes due to the decomposition of dry meadow grasses, *Juncus communis* and canary reed. It has been established that the removal of the upper root layer of peat during the implementation of measures for the environmental rehabilitation of a peatland with a predominance of meadow grasses will reduce greenhouse gas emissions by 5.5–5.8 times, with a predominance of a spreading *Juncus communis* – by 11.8–21.9 times, and with a dominant species of reed canary – by 8.1–13.7 times.

Keywords: greenhouse gases, methane, carbon dioxide, peatland, ecological rehabilitation, meadow grass, *Juncus communis*, reed-canary grasses.

СОДЕРЖАНИЕ

СТРОИТЕЛЬСТВО

<i>Лазовский Д.Н., Глухов Д.О., Хаткевич А.М., Колтунов А.И.</i> Аппроксимации диаграмм деформирования бетона в нелинейном расчете внецентренно сжатых трубобетонных элементов	2
<i>Морозова Е.Б.</i> Развитие категории художественного в промышленной архитектуре Беларуси	13
<i>Невейков А.Н., Талецкий В.В., Дедок В.Н., Лукасевич А.В.</i> Выбор программного обеспечения для расчетов устойчивости откосов высоких насыпей земляного полотна железных дорог	23
<i>Соловьёв А.А.</i> Полоцкий бернардинский монастырь: натурные обследования этажей и чердака келейного корпуса	29
<i>Строганова А.Д.</i> Визуальный осмотр состояния отмостки клёпаного вертикального резервуара для хранения нефтепродуктов	40

ГЕОДЕЗИЯ

<i>Дегтярёв А.М., Парадня П.Ф.</i> Матричное обобщение преобразований топоцентрических координат	46
--	----

ГЕОЭКОЛОГИЯ

<i>Иванов В.П., Леонович И.А., Кульбей А.Г., Бердашкевич В.В.</i> Оценка величины загрязняющих веществ, поступивших в результате аварийных утечек в окружающую среду	51
<i>Ратникова О.Н., Ракович В.А., Ярмошук Т.Д., Лисицына И.П., Борш А.Т.</i> Стадии повторного заболачивания на выработанном участке торфяного месторождения низинного типа Ивановское	58
<i>Ярмошук Т.Д., Ракович В.А.</i> Эмиссии диоксида углерода и метана при имитационном заболачивании низинного торфяника с различным составом растительного покрова	67