

УДК 624.154.5

DOI: 10.17213/mgvgif/2026-5-461-470

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ФУНДАМЕНТОВ ВОДОПРОПУСКНЫХ ТРУБ НА МЕЛИОРАТИВНЫХ СИСТЕМАХ (на примере Яхромской поймы)

А. Д. Пономаренко, О. Н. Осипова

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия

Аннотация. Объектом исследования являются фундаменты водопропускных труб 39 шлюзов-регуляторов мелиоративной системы Яхромской поймы (Московская область), характеризующейся сложными инженерно-геологическими условиями (III категория, подтопление, торфы, илы). Представлен сравнительный анализ свайного и плитного вариантов фундаментов по критериям несущей способности, деформациям, стоимости и технологичности. Предложена BIM-ориентированная система геотехнического мониторинга осадок с интеграцией в цифровой двойник сооружения. Плитный фундамент рекомендован как основное решение для данных условий.

Ключевые слова: водопропускная труба, шлюз-регулятор, плитный фундамент, свайный фундамент, осадка, несущая способность, мелиоративная система, BIM-мониторинг, Яхромская пойма, ЛИРА САПР, сравнительный анализ, технико-экономическое обоснование

COMPARATIVE ANALYSIS OF STRUCTURAL SOLUTIONS FOR CULVERT FOUNDATIONS ON RECLAMATION SYSTEMS (case study of the Yakhroma floodplain)

A. D. Ponomarenko, O. N. Osipova

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia

Annotation. Foundations of culverts for 39 sluice-regulators of the Yakhroma floodplain reclamation system (Moscow region), characterized by complex engineering-geological conditions (category III, flooding, peat, silt). Comparative analysis of pile and slab foundation options by criteria of bearing capacity, deformability, cost, and technological efficiency. A BIM-oriented geotechnical monitoring system integrated with the digital twin of the structure is proposed. The slab foundation is recommended as the primary solution for the given conditions.

Keywords: culvert, sluice-regulator, slab foundation, pile foundation, settlement, bearing capacity, reclamation system, BIM-monitoring, Yakhroma floodplain, LIRA SAPR, comparative analysis, feasibility study

Введение

Объектом исследования является проект «Реконструкция межхозяйственных каналов, насосных станций на мелиоративных системах Яхромской поймы (11-я очередь), Дмитровский район, Московская область». В рамках проекта предусмотрена реконструкция и строительство 39 шлюзов-регуляторов на различных каналах мелиоративной сети.

Территория Яхромской поймы характеризуется сложными инженерно-геологическими условиями (III категория сложности по СП 47.13330.2016): повсеместное подтопление (типы I-A-1 и I-A-2), наличие органоминеральных и органических грунтов (торфы, илы), насыпные грунты приканальных дамб, высокий уровень грунтовых вод (0,5–2,0 м от поверхности), гидравлически связанных с мелиоративными каналами. Нормативная глубина промерзания составляет 1,19 м, абсолютный минимум температур достигает $-43\text{ }^{\circ}\text{C}$. Совокупность этих факторов создаёт сложные условия для устройства фундаментов водопропускных труб и требует обоснованного выбора между свайным и плитным вариантами.

Проблема выбора типа фундамента для водопропускных труб в слабых грунтах не является новой, однако для мелиоративных систем со своей спецификой (регулярное подтопление, ирригационный режим, стеснённые условия) она освещена в литературе недостаточно. В работе [1] показано, что применение свай под водопропускными трубами снижает осадку, но создаёт концентрацию напряжений на верх трубы. В [2] провели сравнительное исследование плитных фундаментов коробчатых водопропускных труб на слабых грунтах и установили, что при достаточной несущей способности основания плитный фундамент является более экономичным решением. В исследованиях [3] подтверждается, что выбор между свайным и плитным фундаментом для малых гидротехнических сооружений в аллювиальных грунтах требует комплексного технико-экономического обоснования с учётом местных условий.

Первоначально в проекте был принят свайный фундамент (забивные сваи сечением 30×30 см, длиной 5 м, с монолитным ростверком 1500×300 мм). Однако в ходе рабочего проектирования возникла необходимость оценки альтернативного варианта — монолитной железобетонной плиты толщиной 300 мм. Основанием для пересмотра послужили: высокая трудоёмкость свайных работ в стеснённых условиях мелиоративной системы, необходимость водопонижения при забивке свай в обводнённых грунтах, а также достаточная несущая способность грунтового основания, подтверждённая последующими поверочными расчётами.

Целью настоящей работы является сравнительный анализ двух конструктивных решений фундаментов (свайного и плитного) для водопропускных труб шлюзов-регуляторов на примере 5 характерных сооружений Яхромской поймы, различающихся диаметром труб, количеством очков и грунтовыми условиями в основании.

Основная часть

Проект охватывает 39 шлюзов-регуляторов, расположенных на каналах мелиоративной сети: НЯ-13, НЯ-13-21, МЯ-21, МЯ-21-1, МЯ-21-2, МЯ-25, МЯ-27, СР-15 и других. Все сооружения относятся к ГТС IV класса ответственности с коэффициентом надёжности по ответственности

$\gamma_n = 1,10$ (согласно СП 58.13330.2019 [9]). Класс нагрузки на сооружения — К11, расчётная вероятность превышения максимальных расходов паводков — 5 %.

Для детального анализа выбраны пять сооружений, максимально различающихся по ключевым параметрам:

Таблица 1. Характеристики выбранных сооружений

Параметр	2.2	21.5	21.7	12.2	18.1
Канал	НЯ-13	НЯ-13	НЯ-13	МЯ-21	р. Яхрома
Диаметр трубы, мм	1250	1250	1500	1500	1000
Количество труб, шт.	2	2	4	3	2
Длина средней части, м	21	15	15	18	21

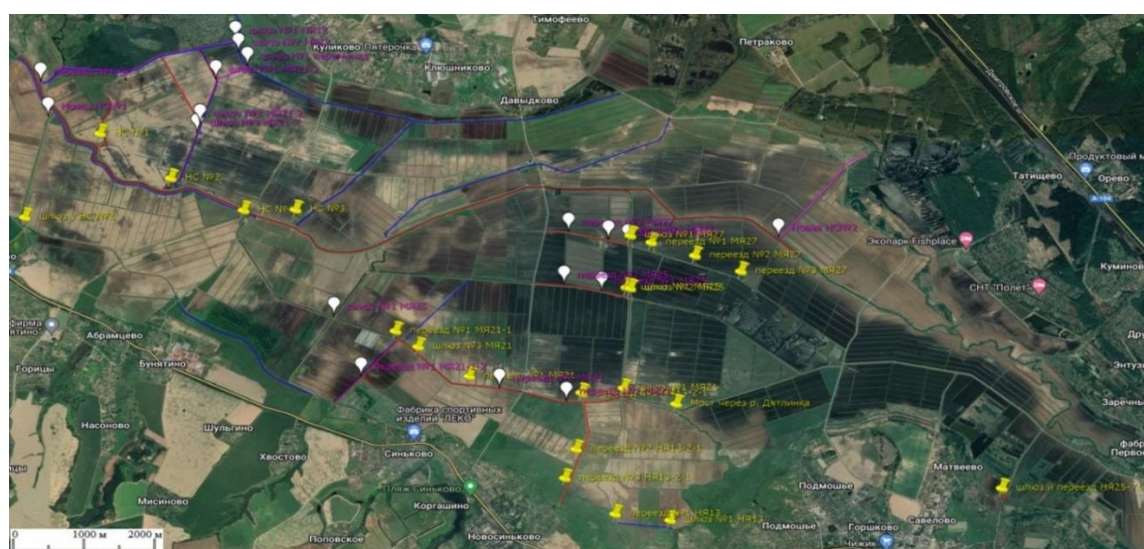


Рис. 1. Ситуационный план объекта с указанием расположения рассматриваемых сооружений

Геологический разрез площадки представлен следующими инженерно-геологическими элементами:

Таблица 2. Сводный геологический разрез

ИГЭ	Грунт	Мощность, м	γ , кН/м ³	ϕ , град	c , кПа	E , МПа	IL	e
1	Насыпной грунт	0,5–1,5	—	—	—	—	—	—
2	Суглинок мягкопластичный	2,0–4,0	19,0	18	15	12	0,55	0,70
3	Суглинок тугопластичный	3,0–6,0	20,0	21	22	18	0,30	0,60
4	Песок средней крупности	4,0–8,0	20,5	35	0	30	—	0,55
5	Песок гравелистый	5,0–10,0	21,0	38	0	40	—	0,50
6	Глина полутвёрдая	8,0–15,0	21,5	24	40	25	0,15	0,55
7	Суглинок мягкопластичный	2,5–4,0	18,3–20,0	20–21	12–18	12–18	0,52–0,73	0,49–0,66
8	Суглинок тугопластичный	3,0–5,0	18,3–20,3	21–22	12–26	12–18	0,39–0,73	0,49–0,66
9	Суглинок мягкопластичный	2,0–4,0	20,0	20	18	12	0,73	0,66
11	Суглинок тугопластичный	3,0–5,0	19,3	17	16	18	—	0,80

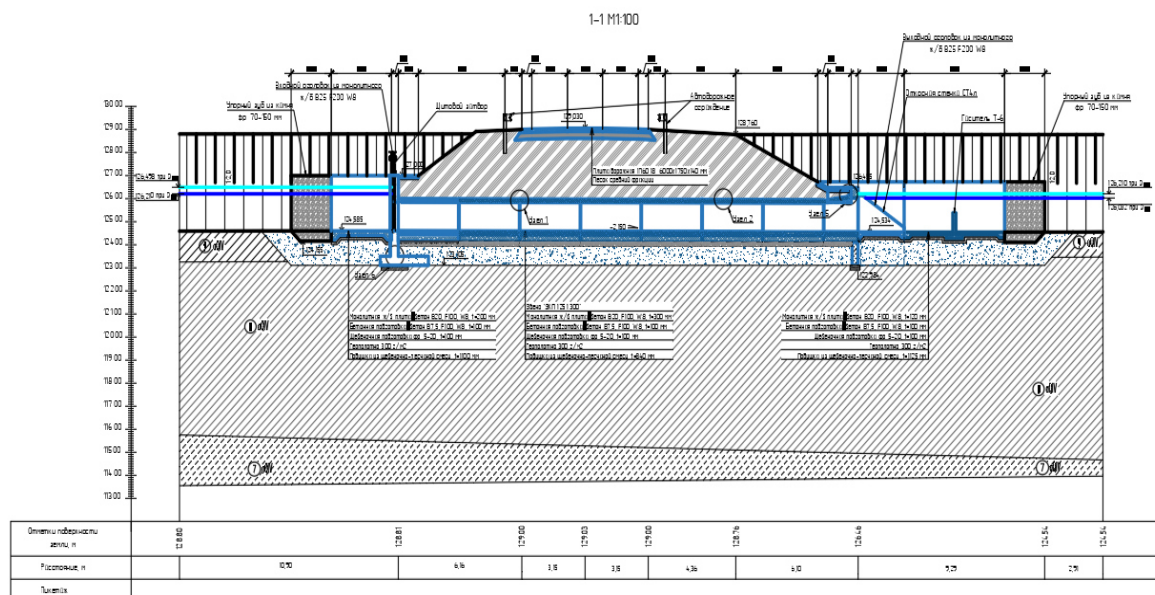


Рис. 2. Продольный разрез по сооружению 2.2

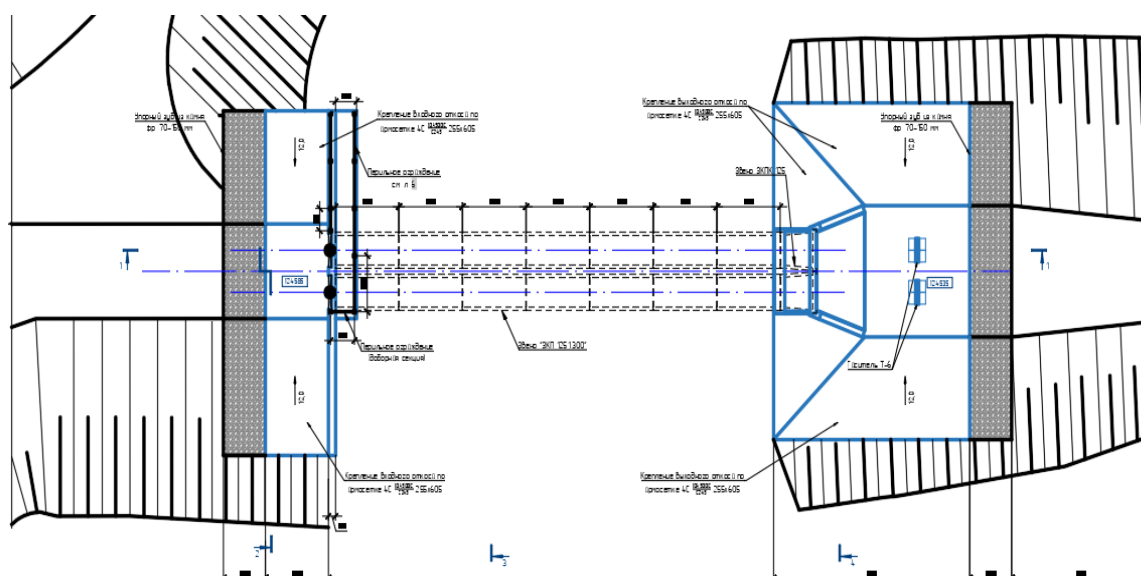


Рис. 3. План и продольный разрез типового шлюза-регулятора (на примере 2.2)

Поверхностным слоем на значительной части территории каналов являются торфяные отложения (органоминеральные и органические грунты) мощностью до 1,5–2,0 м, подстилаемые илами и насыпными грунтами приканальных дамб. Наличие торфа в ложе каналов создаёт дополнительные сложности для производства строительных работ: низкая несущая способность (менее 50 кПа), высокая сжимаемость и влажность (до 200 % – 400 %), тиксотропные свойства при динамических воздействиях. Для сваябойной техники это означает необходимость устройства сланей или матов большой площади для распределения нагрузки, что существенно увеличивает подготовительные работы и стоимость строительства.

Конструкции фундаментов

Вариант 1 — плитный фундамент (принятый в проекте). Фундамент водопропускных труб представляет собой монолитную железобетонную плиту толщиной 300 мм из тяжёлого бетона класса В25, марки по морозостойкости F200 и водонепроницаемости W8. Армирование — арматурой А500С. В основании предусмотрена замена слабого грунта на смесь песчано-гравийную природную (ПГС) по ГОСТ 23735-2014 на глубину, превышающую нормативную глубину промерзания на 250 мм ($1,19 + 0,25 = 1,44$ м от верха плиты). Послойное уплотнение ПГС выполняется до плотности сухого грунта $g = 1,65$ т/м³. Далее устраивается разделительная прослойка из геополотна плотностью 300 г/м², щебеночное основание толщиной 100 мм (щебень гравийный фракции 5–20 мм М800) и бетонная подготовка толщиной 100 мм из бетона класса В7.5 (М100).

Вариант 2 — свайный фундамент (первоначальный проект). Фундамент водопропускных труб на сваях включает забивные сваи квадратного сечения 30×30 см, длиной 5 м, с опиранием на ИГЭ-4 (песок средней крупности). Поверх свай устраивается монолитный железобетонный ростверк сечением 1500×300 мм из бетона В25. Шаг свай в ряду — 0,9 м (3*d*). Для сооружений с количеством труб 2 и более предусматривается двухрядное расположение свай по ширине ростверка.

Методы расчёта

Расчёт плитного фундамента выполнялся в проектно-вычислительном комплексе ЛИРА САПР методом конечных элементов (КЭ типов 5, 42, 44) в пространственной постановке. Расчёт свайного фундамента выполнялся аналитически по методике СП 24.13330.2011 [8].

Расчётное сопротивление грунта основания R для плитного фундамента определялось по формуле (5.7) СП 22.13330.2016 [7]:

$$R = \frac{\gamma_{c1}\gamma_{c2}}{k} [M_{\gamma}k_z b \gamma_{II} + M_q d_I \gamma'_{II} + (M_q - 1) d_b \gamma'_{II} + M_c c_{II}],$$

Несущая способность одиночной сваи F_d определялась по формуле (7), (8) СП 24.13330.2011 [8]:

$$F_d = \gamma_c \left(\gamma_{cR} R A + u \sum \gamma_{cf} f_i h_i \right).$$

Осадка для обоих вариантов определялась методом послойного суммирования по методике СП 22.13330.2016 [7].

Результаты расчётов

Результаты поверочных расчётов плитного фундамента в ПК ЛИРА САПР для пяти рассматриваемых сооружений приведены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты расчёта плитного фундамента

Сооружение	ИГЭ в основании	R , кПа	$p_{\text{ср}}$, кПа	p_{max} , кПа	Коэфф. исп.	Осадка, мм	Глубина сжим. толщи, м
2.2	8	282,8	53,5	87,4	0,50	6	5,41
21.5	8	318,2	50,1	71,3	0,47	6	4,90
21.7	8	318,2	68,0	111,6	0,50	8	7,00
12.2	9	282,8	53,5	87,4	0,11	17	9,50
18.1	9	282,8	50,0	82,0	0,12	15	9,20

Все сооружения показали достаточную несущую способность основания. Коэффициенты использования грунта составили от 0,11 до 0,50 (запас 50 % – 89 %). Осадки находятся в пределах 6–17 мм, что значительно меньше допускаемых 50 мм для водопропускных труб по СП 35.13330.2011 [6].

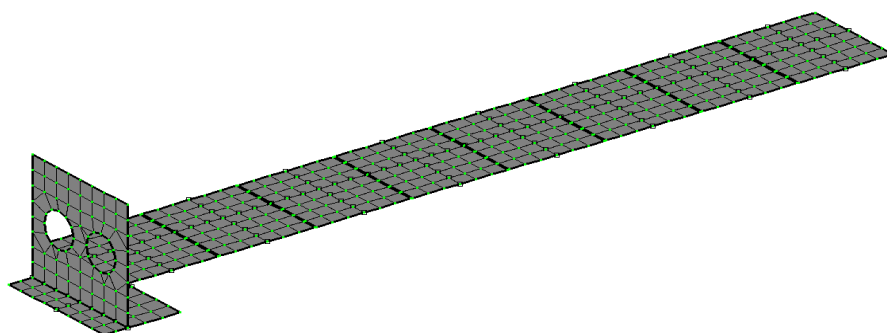


Рис. 4. Общий вид расчетной схемы в ПК ЛИРА САПР (сооружение 2.2)

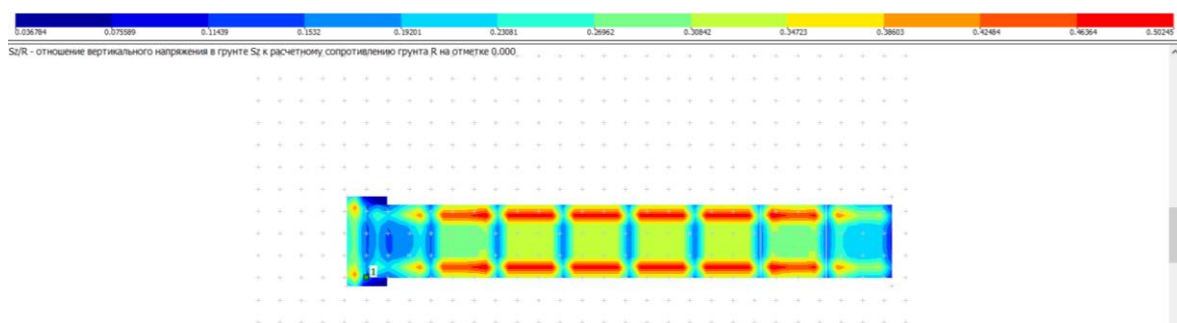


Рис. 5. Результаты расчета основания по деформациям (сооружение 2.2)

Результаты аналитического расчёта свайного фундамента по СП 24.13330.2011 [8] представлены в табл. 4.

Таблица 4. Результаты расчёта свайного фундамента

Сооружение	ИГЭ в основании	Рядов свай	Нагрузка на сваю, кН	Допускаемая нагрузка, кН	Коэфф. исп.	Осадка, мм	Глубина сжим. толщи, м
2.2	8	2	86,8	252,8	0,34	2,2	~4,5
21.5	8	2	81,3	252,8	0,32	2,0	~4,3
21.7	8	2	110,3	252,8	0,44	5,9	~6,0
12.2	9	2	65,1	252,8	0,26	3,5	~5,0
18.1	9	2	108,1	252,8	0,43	2,9	~5,0

Несущая способность свай обеспечена с большим запасом (56 % – 74 %). Осадки свайного фундамента составляют 2,0–5,9 мм.

Сравнительный анализ

Сопоставление результатов расчётов по двум вариантам фундаментов приведено в табл. 5.

Таблица 5. Сравнение плитного и свайного фундаментов

Сооружение	ИГЭ в основании	Осадка (плита), мм	Осадка (свай), мм	Снижение осадки, %	Запас (плита), %	Запас (свай), %
2.2	8	6	2,2	63	50	66
21.5	8	6	2,0	67	53	68
21.7	8	8	5,9	26	50	56
12.2	9	17	3,5	79	89	74

Анализ показывает, что для сооружений на ИГЭ-8 (2.2, 21.5, 21.7 — суглинок тугопластичный) разница в осадках относительно невелика (6–8 мм для плитного фундамента против 2,0–5,9 мм для свайного). Оба варианта обеспечивают достаточный запас по несущей способности. Плитный фундамент использует основание на 47–50%, свайный — на 32 % – 44 %.

Для сооружений на более слабом ИГЭ-9 (12.2, 18.1 — суглинок мягкопластичный) картина иная. Плитный фундамент показывает осадки 15–17 мм, свайный — 2,9–3,5 мм (снижение в 5 раз). Однако при этом плитный фундамент имеет колоссальный запас по несущей способности (88 % – 89 %), что говорит об избыточной площади опирания. Свайный фундамент в этих условиях использует несущую способность свай лишь на 26 % – 43 %.

Технико-экономическое обоснование

Сравнение стоимости устройства 1 погонного метра фундаментов приведено в табл. 6 и на рис. 9.

Таблица 6. Сравнение стоимости 1 пог. м фундамента, руб. (цены 2025 г.)

Статья затрат	Плитный фундамент	Свайный фундамент
Материалы (плита/свай, бетон, арматура)	9 510	16 185
Земляные работы, замена грунта	1 200	—
Геотекстиль, щебень, подготовка	1 730	—
Сваебойные работы	—	3 885
Водопонижение	—	2 000
Временные дороги/слани	—	1 500
Прочие (опалубка, срубка голов)	1 688	888
Итого	12 010	24 458

Плитный фундамент оказывается в 2,04 раза экономичнее свайного, что согласуется с выводами [3] о преимуществе плитных фундаментов для малых гидротехнических сооружений в аллювиальных грунтах. При масштабировании на 39 сооружений проекта экономия составляет ориентировочно 10,2 млн руб.

С технологической точки зрения плитный фундамент также имеет преимущества в условиях Яхромской поймы:

- отсутствие потребности в сваебойной технике и водопонижении;
- возможность круглогодичного производства работ (с противоморозными добавками);
- замена слабого грунта на ПГС работает как дренаж, решая проблему подтопления;
- унификация конструкции для всех 39 сооружений обеспечивает эффект масштаба;
- устойчивость к воздействию торфяных грунтов в основании: в отличие от свайного фундамента, где торфяные отложения требуют специальных мероприятий (слани, маты, лидерное бурение), плитный фундамент опирается на искусственное основание из ПГС, полностью заменяющее слабый торфяной слой. Это исключает риски, связанные с тиксотропным разжижением торфа при динамических воздействиях от сваебойного оборудования.

Инновационная составляющая: система мониторинга осадок

Учитывая, что 39 плитных фундаментов запроектированы с контролируемой осадкой (6–17 мм), но эксплуатируются в сложных инженерно-геологических условиях, целесообразно предусмотреть систему автоматизированного геотехнического мониторинга (АСГМ). Применение BIM-технологий для геотехнического мониторинга мелиоративных сооружений рассмотрено в работе [4] и подтверждено отечественным опытом [5].

Предлагаемая система включает на каждом сооружении:

- 4 гидростатических датчика осадки по углам фундаментной плиты (точность $\pm 0,1$ мм);
- 2 инклинометра на подпорной стене (точность $\pm 0,01^\circ$);
- 2 термодатчика в теле плиты;
- блок сбора данных с GSM/LoRa-передачей на облачный сервер;
- автономное питание от солнечной панели.

Система обеспечивает непрерывный контроль осадок и кренов с автоматическим оповещением диспетчера при превышении пороговых значений (осадка > 25 мм или скорость $> 0,5$ мм/сут).

Интеграция с BIM-моделью и цифровым двойником сооружения

Данные, поступающие с датчиков АСГМ, предлагается интегрировать в BIM-модель шлюза-регулятора, разработанную на стадии проектирования.

Каждый датчик привязывается к соответствующему элементу модели (фундаментная плита, стена) через уникальный идентификатор (*GUID*). Это позволяет:

- визуализировать текущие осадки и крены непосредственно на 3D-модели сооружения (цветовая индикация: зелёный — норма, жёлтый — повышенное внимание, красный — превышение порога);
- сопоставлять фактические деформации с расчётными значениями, заложенными в конечно-элементную модель (ЛИРА САПР) на стадии проектирования, и автоматически выявлять расхождения;
- накапливать историю деформаций в атрибутах *BIM*-элементов для последующего анализа и уточнения нормативных методик расчёта;
- формировать цифровой двойник (*Digital Twin*) сооружения, который в реальном времени отражает его фактическое техническое состояние и может использоваться для прогнозирования остаточного ресурса.

Стоимость интеграции АСГМ с *BIM*-моделью на одно сооружение оценивается в 50–80 тыс. руб. (настройка среды общих данных, привязка датчиков, создание *dashboard*). Таким образом, полная стоимость системы мониторинга с *BIM*-интеграцией составит около 350–380 тыс. руб. на одно сооружение, или 13,7–14,8 млн. руб. на все 39 объектов.

Внедрение *BIM*-ориентированной системы геотехнического мониторинга соответствует концепции «Цифрового мелиоративного объекта» и позволяет перейти от регламентных визуальных осмотров к риск-ориентированному управлению техническим состоянием сооружений.

Заключение

Выполненные поверочные расчёты плитного фундамента в ПК ЛИРА САПР показали, что несущая способность основания обеспечена для всех пяти рассматриваемых сооружений. Коэффициенты использования грунта составляют от 0,11 до 0,50 (запас 50 % – 89 %), осадки — от 6 до 17 мм, что значительно ниже предельно допускаемых 50 мм по СП 35.13330.2011 [6].

Свайный фундамент обеспечивает меньшие осадки (2,0–5,9 мм), однако является избыточным по несущей способности: коэффициент использования свай составляет 0,26–0,44 при запасе 56 % – 74 %.

Плитный фундамент в 2,04 раза экономичнее свайного (12 010 руб./пог. м против 24 458 руб./пог. м). При масштабировании на 39 сооружений экономия достигает 10,2 млн руб., что подтверждает выводы [2, 3] о предпочтительности плитных фундаментов при достаточной несущей способности основания.

Наличие торфяных отложений в основании каналов создаёт критические сложности для сваебойной техники (необходимость сланей, матов, риск тиксотропного разжижения), в то время как плитный фундамент с заменой грунта на ПГС полностью снимает эту проблему.

Замена слабого грунта на ПГС на глубину 1,44 м (ниже нормативного промерзания на 250 мм) одновременно решает задачи дренажа, морозозащиты и обеспечения несущей способности.

Предложенная BIM-ориентированная система геотехнического мониторинга с передачей данных в цифровой двойник сооружения соответствует современным тенденциям, описанным в работах [4, 5], и обеспечивает переход от регламентных осмотров к риск-ориентированному управлению техническим состоянием, что особенно актуально для 39 однотипных сооружений, рассредоточенных на значительной территории.

Список источников

1. Wang X., Feng Z., Wang S., Wang W. Experimental Study and Numerical Simulation of the Effect of Rigid Pile Composite Foundations on Slab Culverts // *Advances in Civil Engineering*. — 2023. — Vol. 2023. — P. 1–10. DOI: 10.1155/2023/4778445.
2. Liu Y., Zhang J., Chen L. Performance of Slab Foundations for Box Culverts on Soft Soils: A Comparative Study // *Geotechnical and Geological Engineering*. — 2022. — Vol. 40, Issue 8. — P. 4123–4138. DOI: 10.1007/s10706-022-02145-8.
3. Hassan M., Ahmed S., Rahman M. Cost-Benefit Analysis of Pile vs. Raft Foundations for Small Hydraulic Structures in Alluvial Soils // *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. — 2024. — Vol. 150, Issue 3. — P. 04024005. DOI: 10.1061/JIDEDH.IRENG-10234.
4. Gupta R., Sharma P., Kumar A. BIM-Based Geotechnical Monitoring of Irrigation Infrastructure: A Case Study of Canal Regulators // *Water Resources Management*. — 2023. — Vol. 37, Issue 12. — P. 4789–4805. DOI: 10.1007/s11269-023-03567-2.
5. Петров, И. А. Применение плитных фундаментов на слабых грунтах в гидротехническом строительстве / И. А. Петров, В. Н. Сидоров // *Вестник МГСУ*. — 2024. — Т. 19. — № 3. — С. 345–358. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3.345-358. СП 35.13330.2011. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84*. — М.: НИЦ «Строительство», 2011. — 346 с.
6. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*. — М.: НИЦ «Строительство», 2016. — 225 с.
7. СП 24.13330.2011. Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85. — М.: НИЦ «Строительство», 2011. — 85 с.
8. СП 58.13330.2019. Гидротехнические сооружения. Основные положения. — М.: Стандартинформ, 2019. — 42 с.
9. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. — М.: НИИЖБ им. Гвоздева, 2018. — 143 с.

© Пономаренко А. Д., Осипова О. Н., 2026