



УДК 627.824.3.04

doi: 10.55287/22275398\_2026\_59\_5

## МЕТОДИКА АНАЛИЗА ДАННЫХ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ ДЛЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ III И IV КЛАССОВ ОПАСНОСТИ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

А. Е. Качаев  
С. С. Турапин  
В. В. Каштанов  
А. А. Медведева  
Д. В. Булгаков

Всероссийский научно-исследовательский институт систем орошения и сельхозводоснабжения «Радуга», г. Коломна

### Аннотация

В исследовании представлена методика анализа (оценки) данных интернета вещей (IoT) для гидротехнических сооружений III и IV классов опасности, основанная на математическом планировании эксперимента для функции фильтрационного расхода. Актуальность работы обусловлена необходимостью обеспечения безопасности малых ГТС при жёстких бюджетных ограничениях, когда традиционные системы мониторинга с большим количеством датчиков экономически нецелесообразны. Предложен подход, использующий дробный факторный эксперимент типа  $2^{k-p}$  для оптимального размещения IoT-датчиков, что позволяет сократить их число на 40–60% по сравнению с равномерной сеткой без потери информативности. Разработана регрессионная модель для функции отклика – фильтрационного расхода, включающая главные эффекты и парные взаимодействия факторов (уровень воды, температура, время эксплуатации, осадки). Критерием предаварийного состояния служит анализ остатков с пороговыми значениями, дифференцированными по классам опасности: для III класса –  $2\sigma$  (предавария) и  $3\sigma$  (авария), для IV класса –  $3\sigma$  и  $4\sigma$ , соответственно. В качестве дополнительного диагностического признака используется мониторинг динамики коэффициентов парных взаимодействий. Разработан алгоритм анализа данных, полученных с помощью IoT. Методика может быть использована владельцами действующих ГТС без значительных капитальных затрат в оперативном порядке.

### Ключевые слова

Гидротехнические сооружения, класс опасности, интернет вещей, математическое планирование эксперимента, дробный факторный эксперимент, регрессионная модель.

### Дата поступления в редакцию

26.05.2026

### Дата принятия к печати

31.05.2026

### Введение

Гидротехнические сооружения (ГТС) III и IV классов опасности составляют значительную часть инфраструктуры водного хозяйства Российской Федерации [1]. К ним относятся плотины высотой до

15–20 м, дамбы, каналы, водосбросные сооружения с объёмом водохранилища до 10 млн. м<sup>3</sup> [2]. Согласно Федеральному закону № 117-ФЗ «О безопасности гидротехнических сооружений», для таких объектов также требуется организация мониторинга, однако выделяемые на эти цели ресурсы существенно ограничены по сравнению с ГТС I–II классов.

Современные системы мониторинга на базе интернета вещей (далее IoT — internet of things) демонстрируют высокую эффективность [3–5], но их внедрение на малых ГТС сдерживается экономическими факторами: стоимость развёртывания 100–200 датчиков, волоконно-оптических линий и SCADA-систем реального времени сопоставима с ценой самого сооружения. Возникает противоречие: необходимость обеспечения безопасности при жёстком бюджете на контрольно-измерительную аппаратуру.

Традиционные подходы к размещению датчиков (равномерная сетка, размещение в «наиболее опасных» местах по экспертной оценке) не гарантируют статистической эффективности и часто приводят либо к избыточности, либо к слепым зонам [6].

Анализ литературы показывает следующие тенденции:

1. Классический подход (СП 39.13330.2010<sup>1</sup>, СП 58.13330.2019<sup>2</sup>): регламентирует состав и объём наблюдений, но не предлагает методов оптимизации количества датчиков с учётом класса сооружения.
2. IoT-решения для ГТС [7]: фокусируются на передаче данных, энергоэффективности, но вопросы оптимального размещения датчиков часто решаются эвристически.
3. Математическое планирование эксперимента (МПЭ) [8] широко применяется в химической технологии, металлургии, биотехнологиях. В геотехническом мониторинге единичные работы [9–10] используют полный факторный эксперимент для оценки устойчивости склона, но без привязки к IoT и классам опасности.
4. Анализ остатков и адаптивные модели в мониторинге ГТС рассматривались в работах, однако их применение совместно с МПЭ для III–IV классов не отмечено.

Таким образом, системный подход, объединяющий IoT, МПЭ, регрессионный анализ остатков и дифференцированные пороги по классам опасности, в доступной литературе отсутствует.

### **Цель исследования**

Разработать и обосновать методику анализа (оценки) данных IoT для ГТС III и IV классов опасности, позволяющую за счёт математического планирования эксперимента снизить требуемое количество датчиков без потери информативности; обеспечить статистически обоснованное выделение предаварийных ситуаций; создать инструмент визуального анализа для персонала эксплуатирующего подобные объекты.

**Научная новизна** заключается в методике создания малоресурсной, статистически обоснованной системы мониторинга ГТС III–IV классов, где дефицит датчиков и низкая частота опроса ком-

<sup>1</sup> СП 39.13330.2010. Плотины из грунтовых материалов. Актуализированная редакция СНиП 2.06.05-84: свод правил: издание официальное: утвержден Приказом Министерства регионального развития Российской Федерации (Минрегион России) от 29 декабря 2010 г. № 823: введен в действие с 20 мая 2011 г. — Москва: Минрегион России, 2010. — 82 с.

<sup>2</sup> СП 58.13330.2019. Гидротехнические сооружения. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 33-01-2003: свод правил: утвержден и введен в действие приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 16 декабря 2019 г. № 811/пр: дата введения 2020-06-17 / подготовлен АО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденева». — Москва: Стандартинформ, 2019. — 44 с.

пенсируются математическим планированием эксперимента, а диагностика базируется на анализе остатков и значимости парных взаимодействий, с дифференцированными порогами опасности по классам сооружения.

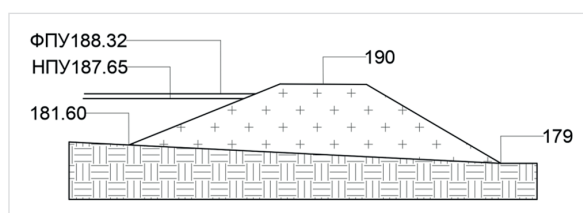
### Методы исследования

Исследование базируется на пяти основных методах: первый — математическое планирование эксперимента (дробный факторный эксперимент  $2^{k-p}$  или полнофакторный эксперимент  $2^k$ ) — используется для оптимизации пространственного размещения IoT-датчиков в теле ГТС или на его поверхности, сокращая их число на 50% без потери информативности; второй — регрессионный анализ с оценкой значимости коэффициентов по  $t$ -критерию Стьюдента — позволяет построить полиномиальную модель отклика (например, расхода фильтрации) с учётом парных взаимодействий факторов; третий — анализ остатков с дифференцированными порогами ( $2\sigma/3\sigma$  для III класса,  $3\sigma/4\sigma$  для IV класса) — служит основой для выделения предаварийных и аварийных ситуации; четвёртый — мониторинг динамики коэффициентов парных взаимодействий  $b_{ij}$  за 7–14 суток — вводится в качестве самостоятельного диагностического признака структурных изменений в сооружении; пятый — имитационное моделирование и создание цифрового двойника объекта — обеспечивает визуализацию функции отклика и проверку методики в режиме реального времени. Выполнена оценка операционной эффективности на основе сравнения минимально необходимого числа датчиков; полноценный экономический анализ требует привязки к конкретному сооружению и составляет перспективу дальнейших исследований. Все методы реализованы в виде алгоритмов, пригодных для автоматизации в дешёвых IoT-контроллерах.

Объектом исследования и апробации является гидротехническое сооружение – однородная грунтовая плотина на озере Сенеж (Московская область). Материал тела плотины — уплотнённый суглинок [11 – 12]. На основе статистической обработки результатов лабораторных испытаний и гидрометеорологических условий определены диапазоны варьирования четырех ключевых факторов:

- **X<sub>1</sub> (уровень верхнего бьефа):** -1 = минимальный (НПУ — 186,65 м), +1 = максимальный (НПУ — 187,65 м)
- **X<sub>2</sub> (температура воды):** -1 = 0 °С (зима), +1 = +20 °С (лето);
- **X<sub>3</sub> (время эксплуатации):** -1 = первые 50 лет, +1 = более 200 лет (фактор весьма значимый, так как объект был построен в 1826 году);
- **X<sub>4</sub> (осадки):** -1 = сухой период (менее 5 мм/сут), +1 = интенсивные дожди (более 30 мм/сут).

Размеры поперечного сечения гидротехнического сооружения представлены на **рис. 1**.



**Рис. 1.** Типовой створ грунтовой плотины озера Сенеж (составлено авторами)

### Основная часть

Методика включает шесть последовательных этапов, которые представлены в виде алгоритма на **рис. 2**.

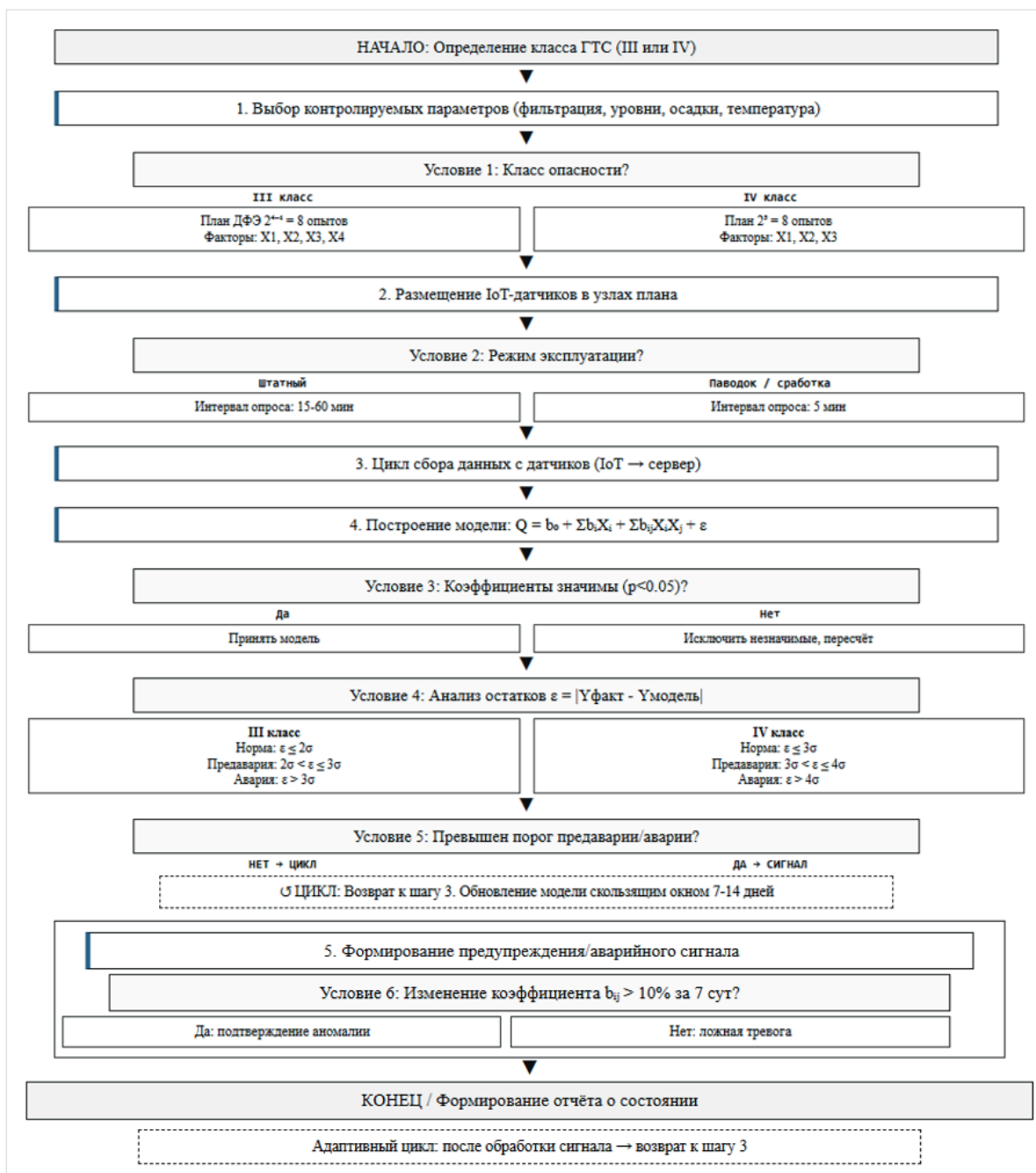


Рис. 2. Типовой створ грунтовой плотины озера Сенеж (составлено авторами)

- 1. Выбор контролируемых параметров (уровень воды, фильтрационный расход, осадки, температура).** На данном этапе устанавливается перечень физических величин, подлежащих мониторингу: фильтрационный расход, уровни верхнего и нижнего бьефов, вертикальные осадки, горизонтальные смещения, температура воды и воздуха, а также мутность дренажных вод. Состав параметров определяется на основе проектной документации ГТС и требований нормативных документов с учётом класса опасности сооружения.
- 2. Выбор значимых факторов и их нормировка.** Из числа контролируемых параметров выделяются факторы, оказывающие наиболее существенное влияние на состояние ГТС: уровень верхнего бьефа ( $X_1$ ), температура воды ( $X_2$ ), время эксплуатации ( $X_3$ ) и интенсивность осадков ( $X_4$ ).

- Каждый фактор нормируется в диапазон  $[-1; +1]$ , что позволяет применять планы математического планирования эксперимента и корректно сравнивать коэффициенты регрессии между собой.
- 3. Цикл сбора данных и построение матрицы планирования**, например, ДФЭ  $2^{k-p}$ . Для III класса опасности используется дробный факторный эксперимент типа  $2^{4-1}$  (8 опытов), а для IV класса — полный факторный план  $2^3$  (также 8 опытов). Матрица планирования определяет комбинации уровней факторов, в которых необходимо производить измерения, что обеспечивает максимальную информативность на каждый установленный датчик.
  - 4. Размещение датчиков в узлах плана.** Каждому «опыту» из матрицы планирования соответствует конкретная точка на сооружении (створ, пьезометрическая скважина, гребень плотины), где устанавливаются датчики. Сбор данных осуществляется циклически: в штатном режиме с интервалом 15–60 минут, в паводковый период — каждые 5 минут, с передачей информации по каналам, например, LoRaWAN (Long Range Wide Area Network), NB-IoT (Narrow Band Internet of Things) или сотовой связи.
  - 5. Сбор данных и построение регрессионной модели.** На основе собранных данных методом наименьших квадратов строится полиномиальная модель первого порядка с учётом парных взаимодействий факторов:  $Q = b_0 + \sum b_i X_i + \sum b_{ij} X_i X_j + \varepsilon$ . Значимость полученных коэффициентов оценивается по  $t$ -критерию Стьюдента при доверительной вероятности 0,95; незначимые коэффициенты исключаются из модели с последующим пересчётом.
  - 6. Анализ остатков и выдача сигналов.** Вычисляются остатки  $\varepsilon = |Y_{\text{факт}} - Y_{\text{модель}}|$ , которые сравниваются с пороговыми значениями, дифференцированными по классу опасности: для III класса —  $2\sigma$  (предавария) и  $3\sigma$  (авария); для IV класса —  $3\sigma$  и  $4\sigma$  соответственно. При превышении порогов формируется предупреждение или аварийный сигнал, а также дополнительно анализируется динамика коэффициентов парных взаимодействий  $b_{ij}$ : их изменение более чем на 10% за 7 суток служит подтверждением структурных изменений в теле сооружения.

Алгоритм автоматически изменяет параметры мониторинга в зависимости от класса ГТС: для III класса — план ДФЭ  $2^{4-1}$  (4 фактора), более жёсткие пороги анализа остатков ( $2\sigma$  — предавария,  $3\sigma$  — авария); для IV класса — полный факторный план  $2^3$  (3 фактора), расширенные пороги ( $3\sigma$  — предавария,  $4\sigma$  — авария), что снижает число ложных тревог [13–14].

### Результаты

Обоснование варьируемых факторов. Физически — каждый фактор влияет на фильтрационный режим (закон Дарси, вязкость воды, старение грунта, дополнительное питание). Нормативно — соответствуют требованиям СП 58.13330.2019 к мониторингу ГТС. Практически — могут быть измерены стандартными недорогими IoT-датчиками. Экономически — для IV класса можно исключить осадки, снижая число датчиков.

Для ГТС III–IV классов принимаются факторы:

- $X_1$  — уровень верхнего бьефа (нормированный от  $-1$  до  $+1$ ,  $H$ );
- $X_2$  — температура воды (нормированная от  $-1$  до  $+1$ ,  $T$ );
- $X_3$  — время с начала эксплуатации (суток, лет,  $t$ );
- $X_4$  — интенсивность осадков (для фильтрационных процессов  $л/(с\cdot га)$ ,  $q$ ).

Для IV класса достаточно трёх факторов:  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ . Используется ДФЭ  $2^{4-1}$  (8 опытов).

Функция отклика для расхода фильтрации  $Q$  будет иметь следующий вид регрессии при  $X_3 = X_4 = 0$ :

$$Q = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{11}X_1^2 + b_{12}X_1X_2 + \varepsilon,$$

где  $b_0$  — это свободный член регрессионной модели;  $b_1$  — это коэффициент при факторе  $X_1$  (уровень верхнего бьефа);  $b_2$  — это коэффициент при факторе  $X_2$  (температура воды);  $b_{11}$  — это коэффициент при квадратичном члене  $X_1^2$ ;  $b_{12}$  — это коэффициент парного взаимодействия между факторами  $X_1$  (уровень верхнего бьефа) и  $X_2$  (температура воды);  $\varepsilon$  — случайная ошибка (остаток).

Конкретная модель (полученной имитационно для плотины на озере Секнеж) при  $X_3 = X_4 = 0$  в натуральном виде записывается в виде следующего уравнения регрессии:

$$Q = 4,67 - 0,715 \cdot H + 0,033 \cdot T + 0,045 \cdot H^2 - 0,0025 \cdot H \cdot T. \quad (1)$$

Каждый «опыт» в матрице ДФЭ, показанной в **табл. 1**, соответствует одной точке на сооружении (створ, скважина, место установки датчика). Матрица задаёт комбинации факторов, для которых необходимо снимать показания. Это обеспечивает максимальную информативность на единицу датчика и позволяет оценить не только главные эффекты, но и парные взаимодействия.

Таблица 1

Матрица для планирования эксперимента

№ опыта	$X_1$ (уровень ВБ)	$X_2$ (температура)	$X_3$ (время эксплуатации)	$X_4 = X_1 \cdot X_2 \cdot X_3$ (осадки)
1	-1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1	+1
3	-1	+1	-1	+1
4	+1	+1	-1	-1
5	-1	-1	+1	+1
6	+1	-1	+1	-1
7	-1	+1	+1	-1
8	+1	+1	+1	+1

**Примечание:** составлено авторами при планировании обработки экспериментальных данных

Далее представлен график, который может показать только два изменяющихся фактора, при  $X_3$  и  $X_4$ , зафиксированных на нуле для наглядности. На примере регрессионной модели (1) показано, что отрицательный коэффициент взаимодействия означает: при высоком уровне воды нагрев воды на  $20^\circ\text{C}$  даёт прирост расхода всего  $+0.06$  л/с, тогда как при низком уровне —  $+0.26$  л/с. Резкое изменение знака или модуля  $b_{ij}$  служит диагностическим признаком.

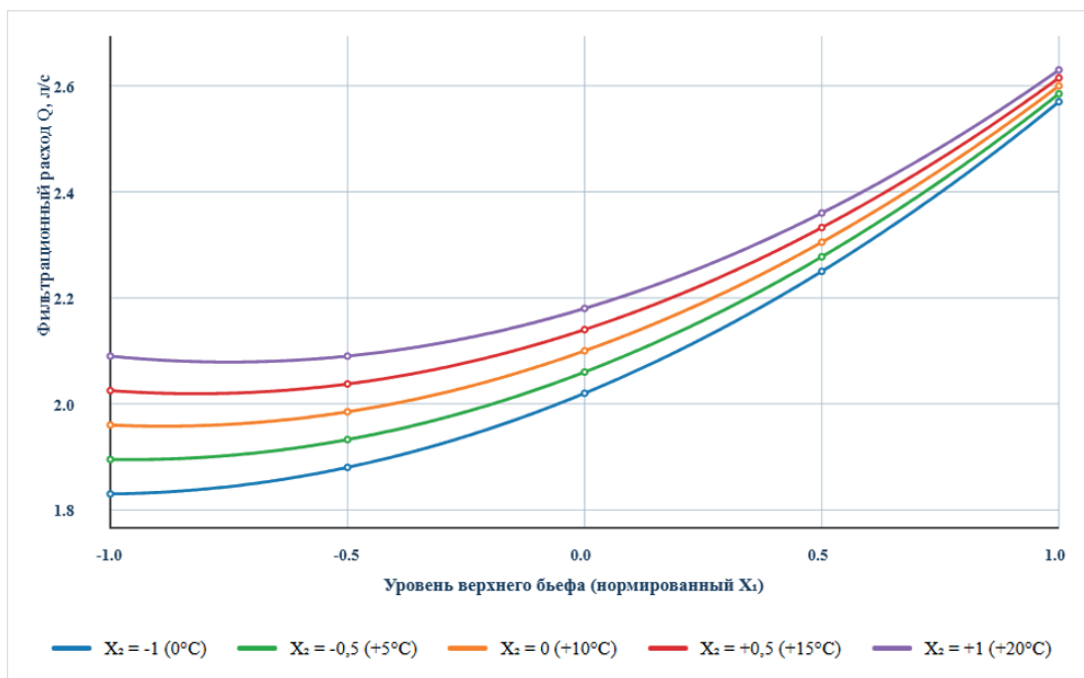


Рис. 3. Графическая зависимость функции отклика (расхода фильтрации)  $Q$  от  $X_1$  (уровня верхнего бьефа) при различных  $X_2$  (температуре) и  $X_3 = X_4 = 0$  (составлено авторами по результатам обработки регрессионной модели)

С учетом установленной регрессионной модели (1) в *табл. 2* показаны критерии оценки состояния объекта. Коэффициент при  $X_1 X_2$  отрицательный, следовательно, при нагреве воды фильтрация растет медленнее (вязкость падает, но структура грунта работает — типично для суглинков). Аномалия: текущий  $Q = 3,8$  л/с, модель предсказывает 2.9 л/с, значит, имеется остаток  $+0.9$  л/с =  $2.8\sigma$ , что говорит о наступлении предаварийного состояния. Причина — локальный суффозионный канал.

Таблица 2

### Критерии оценки состояния ГТС

Показатель	Норма	Предаварийное состояние	Аварийное
Отклонение предсказанного $Y$ от фактического (в $\sigma$ остатков)	$0 - 1,5\sigma$	$1.5 - 3\sigma$ (III кл) / $1.5 - 4\sigma$ (IV кл)	$> 3\sigma$ ( $> 4\sigma$ )
Тренд коэффициента регрессии $b_i$ за 7 суток	Стабилен	Рост $> 10\%$ в день	Рост $> 30\%$ за сутки
Доверительный интервал прогноза (по Фишеру)	Не пересекает ПД	Начинает пересекать	Стойкое превышение

В результате полученных данных можно сделать заключение, что оптимизация размещения датчиков на основе ДФЭ позволяет сократить их количество на 40–60% по сравнению с традиционными подходами (равномерная сетка, интуитивное размещение). Теоретическая экономия относительно полного факторного плана  $2^k$  достигает 50%, однако с учётом реальных ограничений ГТС III–IV классов опасности практический выигрыш составляет 40–60%.

Разработана методика, снижающая требуемое количество IoT-датчиков на 40–60% по сравнению с равномерной сеткой (например, для плотины IV класса вместо 18–20 датчиков требуется 8, согласно плану  $2^3$ ). Обоснованы дифференцированные пороги анализа остатков: для III класса —  $2\sigma/3\sigma$ , для IV класса —  $3\sigma/4\sigma$ . Это снижает ожидаемую частоту ложных тревог с 5% (при пороге  $2\sigma$ ) до 0.3% (при пороге  $3\sigma$ ) для IV класса.

Натурная апробация результатов исследования является перспективой дальнейших мероприятий, направленных на совершенствование метода мониторинга ГТС.

### Заключение

Предложенная методика позволяет организовать эффективный мониторинг ГТС III–IV классов опасности при ограниченном бюджете за счёт математически обоснованного сокращения числа датчиков.

Использование дробного факторного эксперимента (ДФЭ  $2^{k-p}$ ) вместо равномерной сетки или интуитивного размещения датчиков даёт выигрыш в 40–60% по количеству сенсоров без потери качества контроля.

Анализ остатков регрессионной модели с порогами, дифференцированными по классам опасности, позволяет надёжно выделять предаварийные ситуации и снижать число ложных тревог для малых сооружений.

Значимость парных взаимодействий ( $b_{ij}$ ) является самостоятельным диагностическим параметром, отражающим структурные изменения в теле плотины.

Разработанный алгоритм демонстрирует работоспособность методики и может служить основой для создания промышленной системы мониторинга объектов подобного типа.

Исследования проведены в рамках государственного задания Министерства сельского хозяйства Российской Федерации (тема № 102503-2600073-9-4.1.1-4.1.1).

### Библиографический список

1. Водная стратегия Российской Федерации на период до 2036 года и на дальнейшую перспективу до 2050 года [Электронный ресурс] // Минприроды России: официальный сайт. — URL: [https://www.mnr.gov.ru/docs/proekty\\_pravovykh\\_aktov/vodnaya\\_strategiya\\_rossiyskoy\\_federatsii\\_na\\_period\\_do\\_2036\\_goda\\_i\\_na\\_dalneyshuyu\\_perspektivu\\_do\\_2050/](https://www.mnr.gov.ru/docs/proekty_pravovykh_aktov/vodnaya_strategiya_rossiyskoy_federatsii_na_period_do_2036_goda_i_na_dalneyshuyu_perspektivu_do_2050/) (дата обращения: 05.05.2026).
2. Ростехнадзор. Об утверждении федеральных норм и правил в области безопасности гидротехнических сооружений «Требования к обеспечению безопасности гидротехнических сооружений (за исключением судоходных и портовых гидротехнических сооружений)»: Приказ от 08.05.2024 N 151: // Официальный интернет-портал правовой информации. — URL: [pravo.gov.ru](http://pravo.gov.ru) (дата обращения: 05.05.2026). — Текст: электронный.
3. Rumman K. M., Kaltsogiannis Dimitrios, Tsiropoulou Eirini Eleni. Intelligent drone pickup scheduling via deep reinforcement learning in low altitude economy networks // Internet of Things. 2026. Vol. 36. P. 101882.

4. *Wenfeng M.A., Haiyin Jin, Zhangyu Pan. Qil Ling, Jianhua Deng.* Monitoring System Design for Intelligent Hydraulic Safety Based on the IoT // 4-th International Conference on Civil, Architecture and Environment Research IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 676. (2021). 012071.— DOI: 10.1088/1755-1315/676/1/012071.
5. *Jurai Benic, Andelko Vico, Luca Vucetic, Zeljco Srrum.* IOT based Web application concept for monitoring and control of fluid power systems // International conference: Fluid Power 2021: conference proceedings. September 2021. Pp. 316–325. — DOI: 10/18690/978-961-286-513-9.26.
6. *Хименков А. Н., Сергеев Д. О., Кулаков А. П., Романов А. В.* Особенности организации инженерно-геоэкологического мониторинга автомобильных дорог, эксплуатируемых на территориях распространения многолетнемерзлых пород // Арктика и Антарктика. 2023. № 4. С. 125–157. — DOI: 10.7256/2453-8922.2023.4.68814.
7. *Zhou Yihong, Jamil Afzal.* An IoT-Based Mechanism for Monitoring Dam Structures // EasyChair Preprint. 2023. P. 10576.
8. *Меннанов Э. М., Родин С. В., Калафатов Д. А., Богоцкий Ю. Г.* Планирование эксперимента при исследовании силового взаимодействия фундаментов с грунтовым основанием // Строительство и техногенная безопасность. 2024. № 34 (86). С. 31–37.
9. *Евтушенко С. И., Зеленин Е. В., Барыкин Б. Ю., Барыкин А. Б.* Результаты экспериментальных исследований взаимодействия моделей перекрестно-балочного фундамента и наклонного основания при влиянии карстово-обвальных процессов // Construction and Geotechnics. 2024. Т. 15, № 3. С. 26–41. — DOI: 10.15593/2224-9826/2024.3.03.
10. *Prastica R. M. S., Soeryantono H., Marthanty D. R.* Mathematical modelling of hydraulics and water quality characteristics for small dam maintenance. Magazine of Civil Engineering. 2022. 109 (1). Article No. 10903. — DOI: 10.34910/MCE.109.3.
11. *Качаев А. Е., Турапин С. С.* Особенности реконструкции земляных плотин мелиоративных систем // Наука и мир. 2024. № 3. С. 6–10. — DOI: 10.26526/2307-9401-2024-3-6-10.
12. *Романович А. А., Уваров В. А., Орехова Т. Н., Качаев А. Е., Харламов Е. В.* Механизация транспортных процессов в дорожном строительстве: Учебное пособие // Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 2023. — 134 с.
13. *Мозголов М. В., Окольников Г. Э.* К вопросу оценки точности решений моделей метода конечных элементов на примере расчета консольной балки // Системные технологии. 2024. № 1 (50). С. 118–128. — DOI: 10.48612/dnitii/2024\_50\_118-128.
14. *Мозголов, М. В., Костюков В. В., Сидоренко Д. А.* О сходимости решений моделей вычислительного комплекса SCAD из трехгранной призмы первого порядка // Системные технологии. 2023. № 4 (49). С. 144–153. — DOI: 10.55287/22275398\_2023\_4\_144.

---

**INTERNET OF THINGS DATA ANALYSIS METHODOLOGY  
FOR HYDRAULIC STRUCTURES OF HAZARD CLASSES  
III AND IV BASED ON MATHEMATICAL EXPERIMENT PLANNING**

**A. E. Kachaev**  
**S. S. Turapin**  
**V. V. Kashtanov**  
**A. A. Medvedeva**  
**D. V. Bulgakov**

All-Russian Scientific Research Institute of Irrigation and Agricultural Supply Systems “Raduga”, Kolomna

---

**Abstract**

This study presents a methodology for analyzing (evaluating) Internet of Things (IoT) data for hydraulic structures of hazard classes III and IV, based on mathematical experimental design for the seepage flow function. The relevance of this work stems from the need to ensure the safety of small hydraulic structures under strict budget constraints, when traditional monitoring systems with a large number of sensors are economically impractical. An approach is proposed using a fractional factorial  $2^{k-p}$  experiment for the optimal placement of IoT sensors, which reduces their number by 40–60% compared to a uniform grid without loss of information content. A regression model for the response function — seepage flow — is developed, including main effects and pairwise interactions of factors (water level, temperature, operating time, precipitation). The pre-emergency condition criterion is based on residual analysis with thresholds differentiated by hazard class: for class III —  $2\sigma$  (pre-emergency) and  $3\sigma$  (emergency), for class IV —  $3\sigma$  and  $4\sigma$ , respectively. Monitoring the dynamics of pairwise interaction coefficients is used as an additional diagnostic indicator. An algorithm for analyzing data obtained using IoT has been developed. The methodology can be implemented by owners of existing hydraulic structures quickly and without significant capital expenditures.

**The Keywords**

*Hydraulic structures, hazard class, Internet of things, mathematical experiment planning, fractional factor experiment, regression model.*

**Date of receipt in edition**

26.05.2026

**Date of acceptance for printing**

31.05.2026

---

**Ссылка для цитирования:**

*А. Е. Качаев, С. С. Турапин, В. В. Каштанов, А. А. Медведева, Д. В. Булгаков. Методика анализа данных интернета вещей для гидротехнических сооружений III и IV классов опасности на основе математического планирования эксперимента. — Системные технологии. — 2026. — № 2 (59). — С. 5–14.*