

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ ГИДРОТЕХНИКИ имени Б.Е. ВЕДЕНЕЕВА»

ИЗВЕСТИЯ ВНИИГ

им. Б. Е. ВЕДЕНЕЕВА

Издание основано в 1931 году

Том 310

Санкт-Петербург
2023

УДК 626/627 (06)
ISSN 0368-0738

Учредитель:
АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева»



РЕДАКЦИОННО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ СОВЕТ:

В.Б. Штильман (главный редактор), В.Б. Глазовский, Е.Н. Беллендир, Ю.С. Васильев, А.Г. Василевский, В.В. Елистратов, И.И. Загрядский, Т.В. Иванова, Д.А. Ивашинов, В.И. Климович, Г.Л. Козинец, Д.В. Козлов, В.С. Кузнецов, М.Р. Мишина, Р.Н. Орищук, А.Б. Пономарев, В.А. Прокофьев, С.В. Сольский, А.М. Юделевич

В сборнике представлены научные результаты в области гидротехнического строительства, гидравлики, инженерной геологии.

Авторы рассматривают такие направления, как математическое моделирование гидравлических условий и задач гидродинамики; экспериментальные исследования; оценка состояния ГТС после многолетней эксплуатации; результаты систематизации опасных инженерно-геологических процессов и явлений; противодействие биообрастанию технологического оборудования энергообъектов.

Сборник предназначен для специалистов в области инженерной геологии и гидрогеологии, механики грунтов, гидравлики, гидротехники, экологии, а также для студентов, аспирантов и преподавателей соответствующих дисциплин.

The collection includes scientific results in the field of hydraulic engineering, hydraulics and engineering hydrology.

The authors consider such areas as mathematical modeling of hydraulic conditions and hydrodynamics; experimental studies; assessment of the condition of hydraulic structures after many years of operation; results of systematization of hazardous engineering-geological processes; counteraction to biofouling of technological equipment of power facilities.

The collection is intended for specialists in the field of engineering geology and groundwater hydrology, soil mechanics, hydraulics, hydraulic engineering, ecology, as well as for students, postgraduates and lecturers of the respective branches of study.

Сборник «Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» входит в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук (Перечень ВАК) по следующим группам научных специальностей:

- 2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения,
- 2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения,
- 2.1.6. Гидротехническое строительство, гидравлика и инженерная гидрология.

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС-77-36233 от 15 мая 2009 г. выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Подписной индекс издания в каталоге ООО «Урал-Пресс» – 60490.

E-mail: izvestia@vniig.ru

Научная статья
УДК 627.132

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА УЧАСТКЕ р. ВИЛЮЙ МЕЖДУ СТВОРАМИ ВИЛЮЙСКИХ ГЭС-1, 2 И СВЕТЛИНСКОЙ ГЭС

**Наталья Симовна Бакановичус¹, Анна Алексеевна Лялина²,
Анна Александровна Максимова³, Владимир Анатольевич
Прокофьев⁴, Алена Владимировна Пучкарьус⁵, Даниил Дмитриевич
Тесленко⁶**

^{1, 2, 3} АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», Санкт-Петербург, Россия

¹ BakanovichusNS@vniig.ru

² LyalinaAA@vniig.ru

³ MaksimovaAA@vniig.ru

⁴ PuchkaryusAV@vniig.ru

⁵ ProkofyevVA@vniig.ru

⁶ teslenkodd@vniig.ru

Аннотация. Описаны предварительные гидравлические исследования в условиях свободного ото льда русла на участке р. Вилюй на протяжении 141,2 км между створами плотин гидроузлов Вилюйских ГЭС-1, 2 и Светлинской ГЭС. Выявлены основные факторы, влияющие на уровеньный режим нижнего бьефа гидроузла Вилюйских ГЭС-1, 2, определена количественная оценка каждого из них. Приведены варианты сезонно-переменного уровня режима Светлинского водохранилища, обеспечивающие сохранение (неухудшение) условий уровня режима в нижнем бьефе Вилюйских ГЭС-1, 2 по сравнению с существующими условиями.

Ключевые слова: Вилюйские ГЭС-1, 2, Светлинская ГЭС, уровеньный режим нижнего бьефа, обеспечение безопасной эксплуатации ГЭС, обоснование отметки подпорного уровня воды, математическое моделирование гидравлических условий, численная модель гидродинамики

Для цитирования: Бакановичус Н.С., Лялина А.А., Максимова А.А., Прокофьев В.А., Пучкарьус А.В., Тесленко Д.Д. Математическое моделирование гидравлических условий на участке р. Вилюй между створами Вилюйских ГЭС-1,2 и Светлинской ГЭС // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2023. Т. 310. С. 3–16.

Original article

MATHEMATICAL MODELING OF HYDRAULIC CONDITIONS ON THE VILYUY RIVER SECTION BETWEEN THE VILYUY HPP-1, 2 AND THE SVETLINSKAYA HPP

**Natalia S. Bakanovichus¹, Anna A. Lyalina², Anna A. Maksimova³,
Vladimir A. Prokofyev⁴, Alena V. Puchkaryus⁵, Daniil D. Teslenko⁶**

^{1, 2, 3} JSC «Vedeneev VNIIG», Saint Petersburg, Russia

¹ BakanovichusNS@vniig.ru

² LyalinaAA@vniig.ru

³ MaksimovaAA@vniig.ru

⁴ PuchkaryusAV@vniig.ru

⁵ ProkofyevVA@vniig.ru

⁶ teslenkodd@vniig.ru

© Бакановичус Н.С., Лялина А.А., Максимова А.А., Прокофьев В.А., Пучкарьус А.В., Тесленко Д.Д., 2023

Abstract. Preliminary hydraulic studies are described in the conditions of an ice-free channel on the Vilyuy River section for 141.2 km between the dams of the hydroelectric units of Vilyuy HPP-1, 2 and Svetlinskaya HPP. The main factors influencing the steady-state regime of the downstream of the Vilyuy HPP-1, 2 have been identified, and a quantitative assessment of each of them has been determined. The variants of the seasonally variable level regime of the Svetlinsky reservoir are presented, ensuring the preservation (non-deterioration) of the conditions of the level regime in the lower reaches of the Vilyuy HPP-1, 2 compared to existing conditions.

Keywords: *Vilyuy HPP-1, 2, Svetlinskaya HPP, the level mode of the downstream, ensuring the safe operation of hydraulic structures, justification of the water retaining level mark, mathematical modeling of hydraulic conditions, numerical model of hydrodynamics*

For citation: Bakanovich N.S., Lyalina A.A., Maksimova A.A., Prokofyev V.A., Puchkoryus A.V., Teslenko D.D. Mathematical modeling of hydraulic conditions on the Vilyuy river section between the Vilyuy HPP-1, 2 and the Svetlinskaya HPP. *Proceedings of the VNIIG*. 2023;310:3-16. (In Russ.).

Введение

В 2021 г. во ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева для выявления факторов, влияющих на формирование уровенного режима в нижнем бьефе гидроузла Вилюйских ГЭС-1, 2, была проведена комплексная работа, состоящая из последовательно выполненных блоков исследований [1]. Данная статья является продолжением ранее опубликованных статей на эту тему [1, 2] и посвящена предварительным гидравлическим исследованиям в условиях свободного ото льда русла.

Целью гидравлических исследований было определение максимально допустимого подпорного уровня воды Светлинского водохранилища (с учётом фаз годового гидрологического цикла и основных факторов, влияющих на уровенный режим нижнего бьефа гидроузла Вилюйских ГЭС-1, 2) при условии обеспечения безопасной эксплуатации Вилюйских ГЭС-1, 2. В соответствии с действующей на момент выполнения работы Декларацией безопасности ГТС Вилюйских ГЭС-1, 2, допустимое среднегодовое значение уровня нижнего бьефа (УНБ) устанавливается по критерию K1, который с 01.01.2020 г. составляет 179,79 м БС-77 (180,50 м СГ) и критерию K2, значение которого составляет 182,00 м СГ.

Задачей выполнения расчётов гидравлики потока на исследуемом участке р. Вилюй является определение количественной оценки каждого из факторов, обуславливающих уровенный режим р. Вилюй на протяжении 141,2 км между створами плотин гидроузлов Вилюйских ГЭС-1, 2 и Светлинской ГЭС в целом, а также непосредственно в нижнем бьефе у ГТС Вилюйских ГЭС-1, 2.

Параметры расчётов. Калибровка и верификация численной модели гидродинамики

Для проведения численных экспериментов использовалась численная модель гидродинамики, тепло- и массопереноса в плановой постановке, разработанная в АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» и апробированная на ряде крупных водных объектов и гидроузлов. Применяемая 2,5D-численная модель, реализованная на графическом процессоре, достаточно подробно описана в работах [3–5], где также приведены примеры её верификации.

Исходными данными для проведения расчётов гидравлических режимов на исследуемом участке р. Вилюй являются:

цифровая модель рельефа (ЦМР) (расчётная область представлена на рис. 1, её триангулированная поверхность и фрагмент ЦМР – на рис. 2), построенная с использованием данных батиметрической съёмки [6];

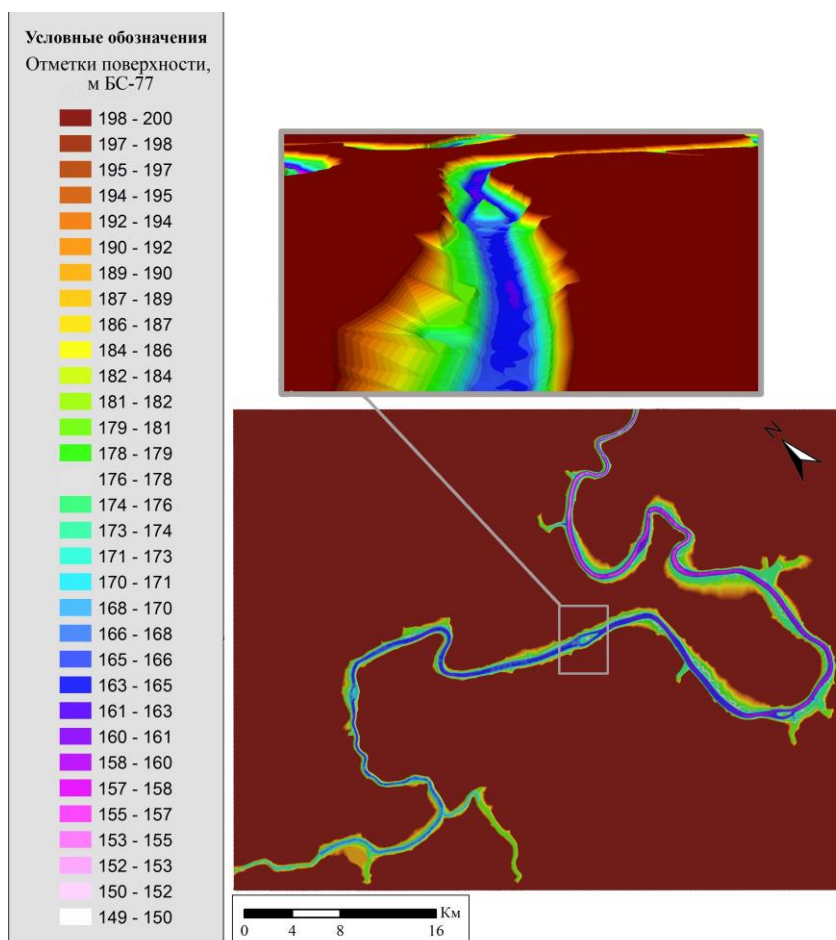


Рис. 1. Расчётная область

карта коэффициентов шероховатости русла (определена на этапе калибровки);

сбросные расходы воды гидроузла Вилюйских ГЭС-1, 2 (включая сбросы через гидроагрегаты и водосброс) задавались в виде точечных источников;

граничное условие на выходной границе расчётной области в виде уровня воды – для верификационных расчётов (а также вариантных расчётов для различных подпорных уровней воды Светлинского водохранилища на отметках 175,00 м БС-77 и выше) или в виде зависимости «уровней-расходов» воды – для проведения вариантных расчётов для случаев в условиях отсутствия Светлинского водохранилища;

расходы воды боковой приточности: задавались в виде точечного источника;

местоположение гидротехнических сооружений и точек сброса расходов воды Вилюйских ГЭС-1, 2.

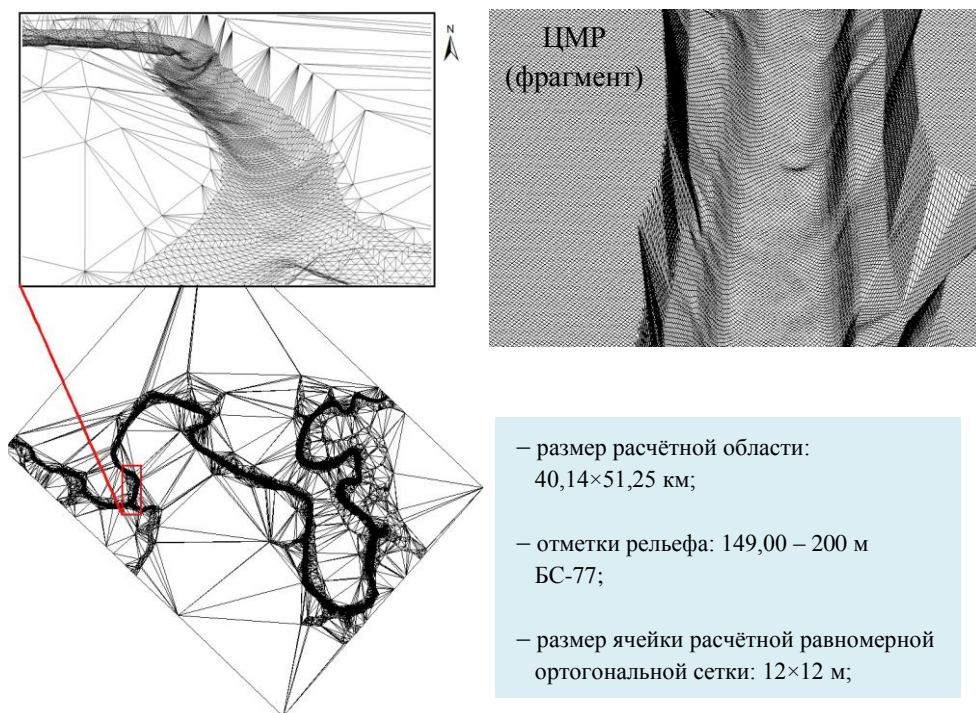


Рис. 2. Триангулированная поверхность расчётной области и фрагмент ЦМР

Перед проведением вариантных численных экспериментов проводилась калибровка и верификация численной модели гидродинамики с использованием натуральных данных наблюдений в нижнем бьефе гидроузла Вилюйских ГЭС-1, 2 для существующих условий, а именно – при эксплуатации Светлинского водохранилища на подпорном уровне 175,00 м БС-77. В качестве калибровочного параметра использовался коэффициент шероховатости. Для проведения верификационных расчётов использовались реальные данные о сбросных расходах воды через гидроузел Вилюйских ГЭС-1, 2 за 2015 г., охватывающие наибольший диапазон суммарных сбросных расходов воды за период эксплуатации Светлинской ГЭС на отметке подпорного уровня воды 175,00 м БС-77. Уровень воды в начальный момент расчёта принимался одинаковым для всей расчётной области, равным уровню воды на выходной границе расчётной области. На выходной границе задавался уровень воды Светлинского водохранилища; на входной границе задавались фактические сбросные расходы Вилюйских ГЭС-1, 2, с дифференциацией их на расходы воды, пропускаемые через гидроагрегаты и осуществляемые через водосброс по эксплуатационным данным 2015 г. Данные о боковой приточности за соответствующий период также использовались по данным наблюдений (сведения Росгидромета). В ходе калибровки численной модели гидродинамики пропускались расходы воды в диапазоне наблюдаемых значений от 255 м³/с до 2 600 м³/с; расчёты были выполнены для различных расходов воды, входящих в этот интервал. Для освещения положения верхней части кривой зависимости $Q = f(H)$ для значительных сбросных расходов воды, пропуск которых на Вилюйских ГЭС-1, 2 в течение эксплуатационного периода не осуществлялся, допол-

нительно проводился расчёт для расходов воды 4 000 м³/с и 5 400 м³/с, при этом уровни воды на выходной границе задавались равными 175,00 м БС-77; величина боковой приточности назначалась равнообеспеченной сбросным расходам.

Анализ результатов верификационных расчётов для численной модели гидродинамики свидетельствует о хорошем соответствии (расхождения составляют не более 10 см) расчётных уровней воды в контрольном створе (нижний бьеф гидроузла Вилюйских ГЭС-1, 2) с натурными данными в условиях пропуска различных расходов воды во всём возможном диапазоне (рис. 3). Таким образом, численная модель гидродинамики является корректной и может использоваться для дальнейших вариантных расчётов.

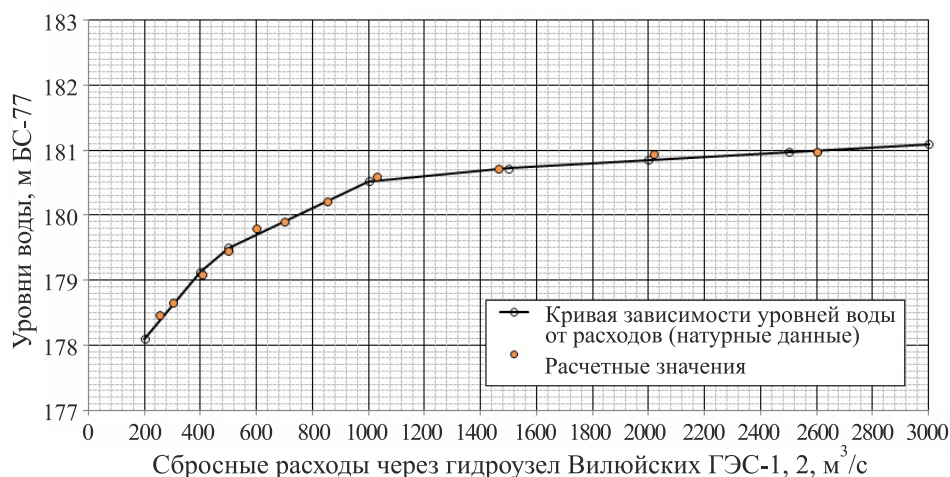


Рис. 3. Кривая зависимости уровней воды от сбросных расходов, построенная по фактическим эксплуатационным данным, и расчётные значения уровней воды

Варианты численных расчётов. Результаты исследований

В общем случае уровенный режим между каскадом станций формируется под влиянием следующих факторов:

- подпорного уровня воды Светлинского водохранилища;
- суммарных сбросных расходов воды через гидроузлы Вилюйских ГЭС-1, 2;

- боковой приточности между гидроузлами;

- морфометрических особенностей русловой части р. Вилюй, обусловленных антропогенным фактором строительства Вилюйских ГЭС-1, 2, в первую очередь, сформированным в нижнем бьефе гидроузла баром примерно в 0,6 км ниже от створа плотины.

Вариантные расчёты выполнялись последовательно, с постепенным повышением отметки подпорного уровня воды Светлинского водохранилища от существующей отметки 175,00 м БС-77 до 181,00 м БС-77 с дискретностью 1,0 или 0,5 м (для предусмотренной проектом промежуточной отметки наполнения Светлинского водохранилища 177,50 м БС-77). Дополнительно проводились расчёты по оценке влияния подъёма уровня Светлинского водохранилища до отметки 175,00 м БС-77 по сравнению с незарегулированными Светлинской ГЭС условиями.

Рассмотрение каждого варианта подпорного уровня воды Светлинского водохранилища включало в себя следующие расчёты и исследования:

расчёт при вариантном значении подпорного уровня воды Светлинского водохранилища в условиях существующего бара в нижнем бьефе Вилюйских ГЭС-1, 2;

расчёт при вариантном значении подпорного уровня воды Светлинского водохранилища в условиях отсутствия бара (его срезки до отметки 174,50 м БС-77);

расчёты с «отключением» боковой приточности для различных расходов воды боковой приточности.

Для различных вариантов подпорного уровня воды Светлинского водохранилища были определены границы зоны выклинивания Светлинского водохранилища для всего диапазона суммарных сбросных расходов воды Вилюйских ГЭС-1, 2. Совмещение продольных профилей водной поверхности позволяет оценить границу зоны влияния при увеличении подпорного уровня воды Светлинского водохранилища для различных суммарных сбросных расходов воды через створ гидроузла Вилюйских ГЭС-1, 2 по сравнению с существующими условиями (подпорный уровень воды Светлинского водохранилища 175,00 м БС-77). Для примера на рис. 4 представлены профили водной поверхности р. Вилюй при различных подпорных уровнях воды Светлинского водохранилища и сбросном расходе 255 м³/с Вилюйских ГЭС-1, 2 в условиях существующего бара, на рис. 5 – совмещённые профили водной поверхности при отметках подпорного уровня воды Светлинского водохранилища 175,00 м БС-77 и 176,00 м БС-77 и наличии бара в нижнем бьефе Вилюйских ГЭС-1, 2 при сбросном расходе воды Вилюйских ГЭС-1, 2 255 м³/с (фрагмент от 0 до 12 км от створа гидроузла Вилюйских ГЭС-1, 2).

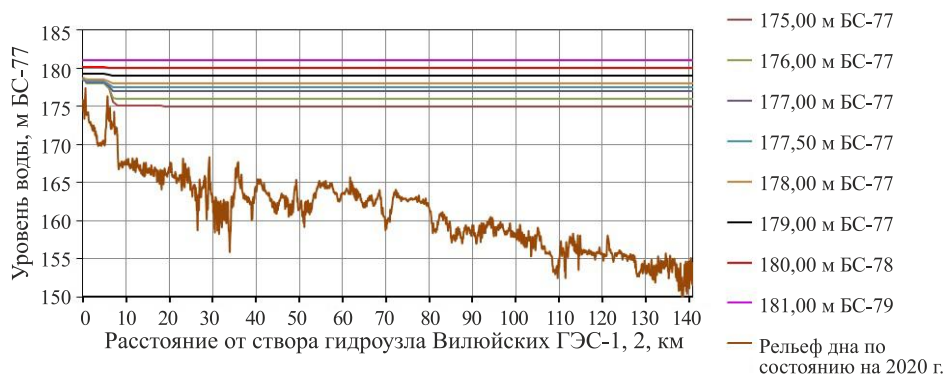
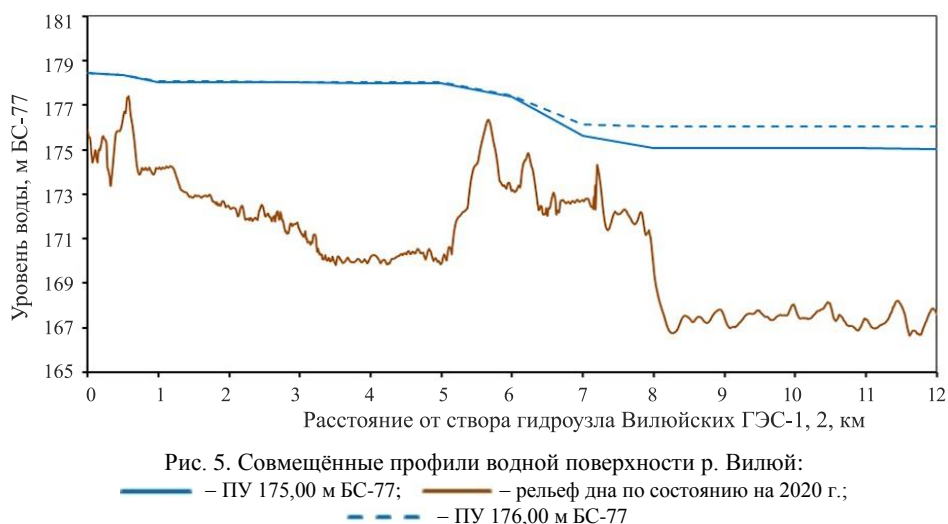


Рис. 4. Профили водной поверхности р. Вилюй при различных подпорных уровнях воды Светлинского водохранилища и сбросном расходе 255 м³/с Вилюйских ГЭС-1, 2

По итогам расчётов была составлена табл. 1, в которой представлены расчётные значения уровня воды в нижнем бьефе гидроузла Вилюйских ГЭС-1, 2 в зависимости от суммарных сбросных расходов воды и отметки подпорного уровня воды Светлинского водохранилища. По этим данным были построены кривые зависимости уровней от сбросных расхо-

дов воды в нижнем бьефе Виллойских ГЭС-1, 2 непосредственно у ГТС гидроузла. Совмещение кривых зависимостей уровней от сбросных расходов воды для существующих условий и для варианта подъёма подпорного уровня воды Светлинского водохранилища позволяет количественно оценить степень влияния последнего на уровеньный режим в нижнем бьефе Виллойских ГЭС-1, 2 для всего диапазона суммарных сбросных расходов воды.



Анализ полученных результатов свидетельствует о следующем:

1. Уровеньный режим нижнего бьефа Виллойских ГЭС-1, 2 непосредственно у ГТС гидроузла зависит от сочетания трёх определяющих факторов: отметки подпорного уровня воды Светлинского водохранилища, суммарных сбросных расходов воды Виллойских ГЭС-1, 2 и наличия/отсутствия бара в нижнем бьефе гидроузла Виллойских ГЭС-1, 2.

2. Создание Светлинского водохранилища с подъёмом уровня воды в нём до отметки 175,00 м БС-77 не повлияло на уровеньный режим нижнего бьефа Виллойских ГЭС-1, 2 у ГТС. При подпорном уровне воды Светлинского водохранилища 175,00 м БС-77 уровеньный режим нижнего бьефа гидроузла Виллойских ГЭС-1, 2 у ГТС формируется только в зависимости от величины суммарного сбросного расхода воды через створ гидроузла. Основным фактором, исключаящим влияние на уровеньный режим в нижнем бьефе гидроузла Виллойских ГЭС-1, 2 подъёма уровня воды Светлинского водохранилища до отметки 175,00 м БС-77, является наличие порогов на 5,5–8 км вниз по течению от створа гидроузла Виллойских ГЭС-1, 2 с высокими отметками дна русловой части р. Виллой.

3. По мере повышения подпорного уровня воды Светлинского водохранилища диапазон расходов воды, при которых наблюдается влияние на уровеньный режим в нижнем бьефе Виллойских ГЭС-1, 2, увеличивается (расширяется), а именно:

при повышении подпорного уровня Светлинского водохранилища до отметки 176,00 м БС-77 влияние на уровеньный режим НБ Виллойских

ГЭС-1, 2 практически не наблюдается для всего диапазона сбросных расходов воды; некоторое незначительное влияние прослеживается для сбросных расходов воды около 200 м³/с и менее (то есть при сбросных расходах воды свыше 200 м³/с подъём отметки Светлинского водохранилища до отметки 176,00 м БС-77 не оказывает влияния на уровенный режим в нижнем бьефе гидроузла Вилюйских ГЭС-1, 2 у ГТС);

Таблица 1

Расчётные значения уровня воды в нижнем бьефе гидроузла Вилюйских ГЭС-1, 2 в зависимости от суммарных сбросных расходов воды и отметки подпорного уровня воды Светлинского водохранилища

Суммарный сбросной расход воды, м ³ /с	Отметка подпорного уровня воды Светлинского водохранилища, м БС-77							
	175,00	176,00	177,00	177,50	178,00	179,00	180,00	181,00
<i>При наличии существующего бара</i>								
255	178,46	178,46	178,50	178,58	178,74	179,34	180,17	181,09
405	179,09	179,09	179,12	179,18	179,29	179,70	180,38	181,21
600	179,80	179,81	179,84	179,88	179,94	180,22	180,72	181,43
855	180,22	180,23	180,25	180,25	180,30	180,48	180,83	181,51
1 030	180,59	180,59	180,61	180,64	180,68	180,84	181,17	180,70
2 020	180,94	180,94	180,94	180,94	180,95	180,99	181,27	181,77
2 600	180,98	180,98	180,98	180,98	180,98	181,03	181,30	181,80
4 000	181,33	181,33	181,33	181,33	181,33	181,33	181,49	181,90
5 400	181,60	181,60	181,60	181,60	181,60	181,60	181,76	182,10
<i>При срезке существующего бара до отметки 174,50 м БС-77</i>								
255	178,19	178,20	178,30	178,43	178,64	179,31	180,16	181,09
405	178,92	178,93	178,99	179,06	179,19	179,65	180,36	181,20
600	179,70	179,70	179,74	179,78	179,85	180,15	180,69	181,41
855	180,16	180,15	180,20	180,20	180,24	180,44	180,81	181,51
1 030	180,57	180,57	180,60	180,62	180,67	180,84	181,17	181,70
2 020	180,92	180,92	180,93	180,93	180,94	180,99	181,27	181,77
2 600	180,96	180,96	180,97	180,97	180,97	181,03	181,3	181,80
4 000	181,33	181,33	181,33	181,33	181,33	181,33	181,49	181,90
5 400	181,60	181,60	181,60	181,60	181,60	181,60	181,76	182,10

при отметках Светлинского водохранилища 177,00 и 177,50 м БС-77 влияние на уровенный режим НБ Вилюйских ГЭС-1, 2 распространяется уже на диапазон суммарных сбросных расходов воды примерно до 1000 м³/с (то есть при сбросных расходах воды свыше 1 000 м³/с подъём отметки Светлинского водохранилища до отметки 177,50 м БС-77 не оказывает влияния на уровенный режим в нижнем бьефе гидроузла Вилюйских ГЭС-1, 2 у ГТС);

распространение влияние на уровенный режим НБ Вилюйских ГЭС-1, 2 при подъёме подпорного уровня Светлинского водохранилища до отметки 178,00 м БС-77 уже охватывает диапазон суммарных сбросных расходов воды примерно до 2 000 м³/с и свыше 3 000 м³/с – при отметке Светлинского водохранилища 179,00 м БС-77;

при отметках Светлинского водохранилища 180,00 м БС-77 и 181,00 м БС подъём подпорного уровня влияет на уровенный режим гидроузла Вилюйских ГЭС-1, 2 во всём возможном диапазоне сбросных расходов воды.

4. При значительных сбросных расходах воды Вилюйских ГЭС-1, 2 уровенный режим НБ Вилюйских ГЭС-1, 2 не зависит от подпорной отметки Светлинского водохранилища.

5. Срезка бара в нижнем бьефе Вилюйских ГЭС-1, 2 наиболее значительно влияет на коррекцию уровенного режима нижнего бьефа Вилюйских ГЭС-1, 2 по сравнению с существующими условиями при сбросных расходах воды примерно до 850 м³/с; при суммарных сбросных расходах воды свыше 1 000 м³/с влияние срезки бара практически не наблюдается.

Обеспеченность соблюдения критерия К1. Допустимые режимы подпорного уровня воды Светлинского водохранилища

После численных расчётов были проведены вариантные водноэнергетические расчёты для Вилюйского водохранилища с использованием гидрологического ряда продолжительностью 87 лет, с определением среднего годового значения УНБ и его среднего многолетнего значения. Проведено сравнение полученных результатов УНБ с расчётными существующими условиями (подпорный уровень воды Светлинского водохранилища 175,00 м БС-77). В табл. 2 представлены выводы по результатам вариантных водноэнергетических расчётов.

На основе комплекса проведённых расчётов в качестве результатов исследований предварительно определялись допустимые режимы подпорного уровня воды Светлинского водохранилища. В качестве базовых значений для сравнения вариантов использовались величина обеспеченности соблюдения неперевышения К1 (среднее годовое значение УНБ = 180,50 м СГ или 179,79 м БС-77) по числу «бесперебойных» лет, которая составляет 80 % (что в среднемноголетнем разрезе за 87-летний период (эксплуатационный период 1968–2019 гг. соответствует соблюдению критерия К1 в течение 70 лет и несоблюдению – в течение 17 лет). В табл. 3 представлены варианты сезонно-переменного уровенного режима Светлинского водохранилища при наличии существующего бара и при его срезке до отметки 174,50 м БС-77. Анализ полученных результатов свидетельствует о том,

что применение сформулированных положений обеспечивает сохранение (неухудшение) условий уровня режима в нижнем бьефе Виллойских ГЭС-1, 2 по сравнению с существующими условиями.

Таблица 2

Выводы по результатам вариантных водноэнергетических расчётов

Отметка подпорного уровня воды Светлинского водохранилища, м БС-77	Обеспеченность соблюдения критерия К1
176	<p>с баром: 80 % (количество лет с нарушением критерия К1 не изменится по сравнению с существующими условиями и составит 17 лет (или 20 %))</p> <p>без бара: 89 % (количество лет с нарушением критерия К1 снизится на 7 лет и составит 10 лет (или 11 %))</p>
177	<p>с баром: 77 % (количество лет с нарушением критерия К1 увеличится на 3 года по сравнению с существующими условиями и составит 20 лет (или 23 %))</p> <p>без бара: 86 % (число лет, для которых критерий К1 соблюдаться не будет, составит 12 лет (или 14 %))</p>
177,5	<p>с баром: 74 % (количество лет с нарушением критерия К1 увеличится на 6 лет по сравнению с существующими условиями и составит 23 года (или 26 %))</p> <p>без бара: 83 % (число лет, для которых критерий К1 соблюдаться не будет, составит 15 лет (или 17 %))</p>
178	<p>с баром: 62 % (количество лет с нарушением критерия К1 увеличится на 16 лет по сравнению с существующими условиями и составит 33 года (или 38 %))</p> <p>без бара: 75 % (число лет, для которых критерий К1 соблюдаться не будет, составит 22 года (или 25 %))</p>
179	Несоблюдение критерия К1 в 100 % случаев при наличии существующего бара и в 98 % случаев – при срезке бара
180	Несоблюдение критерия К1 в 100 % случаев при наличии существующего бара и в 100 % случаев – при срезке бара

Таблица 3

**Варианты сезонно-переменного уровня режима
Светлинского водохранилища**

Период	Условие для соблюдения	Отметка подпорного уровня воды Светлинского водохранилища, м БС-77
При наличии существующего бара		
Для лет со среднемесячными сбросными расходами воды Вилюйских ГЭС-1, 2 в период весеннего половодья более 1 000 м³/с		
Май–Июнь (весеннее половодье)	При прогнозе среднемесячных сбросных расходов воды менее 1 000 м ³ /с	177,00
	При прогнозе среднемесячных сбросов Вилюйских ГЭС-1,2 за месяц весеннего половодья более 1 000 м ³ /с	177,50 (в течение месяца с прогнозом сбросных расходов воды более 1000 м ³ /с)
Июль–Сентябрь	При фактических среднемесячных сбросных расходах воды в течение мая и/или июня более 1 000 м ³ /с	176,00
Октябрь–Апрель		176,00
Для лет со среднемесячными сбросными расходами воды Вилюйских ГЭС-1, 2 в период весеннего половодья менее 1 000 м³/с		
Май–Июнь (весеннее половодье)	При прогнозе среднемесячных сбросных расходов воды менее 1 000 м ³ /с	177,00
Июль–Сентябрь	При фактических среднемесячных сбросных расходах воды в течение и мая, и июня менее 1 000 м ³ /с	177,00
Октябрь–Апрель		176,00
При срезке существующего бара до отметки 174,50 м БС-77		
Для лет со среднемесячными сбросными расходами воды Вилюйских ГЭС-1, 2 в период весеннего половодья более 1 000 м³/с		
Май–Июнь (весеннее половодье)	При прогнозе среднемесячных сбросных расходов воды менее 1 000 м ³ /с	178,00
	При прогнозе среднемесячных сбросов Вилюйских ГЭС-1,2 за месяц весеннего половодья более 1 000 м ³ /с	179,00 (в течение месяца с прогнозом сбросных расходов воды более 1 000 м ³ /с)
Июль–Сентябрь	При фактических среднемесячных сбросных расходах воды в течение мая и/или июня более 1 000 м ³ /с	177,50
Октябрь–Апрель		177,50
Для лет со среднемесячными сбросными расходами воды Вилюйских ГЭС-1, 2 в период весеннего половодья менее 1 000 м³/с		
Май–Июнь (весеннее половодье)	При прогнозе среднемесячных сбросных расходов воды менее 1 000 м ³ /с	178,00
Июль–Сентябрь	При фактических среднемесячных сбросных расходах воды в течение и мая, и июня менее 1 000 м ³ /с	178,00
Октябрь–Апрель		177,50

Заключение

В целом необходимо отметить, что две станции (Вилуйские ГЭС-1, 2 и Светлинская ГЭС), эксплуатируемые в каскаде, имеют разнонаправленные задачи: не превышение УНБ выше определённого предела – для Вилуйских ГЭС-1, 2 и заинтересованность в повышении подпорного уровня водохранилища вплоть до проектной отметки – для Светлинской ГЭС, что обуславливает конфликт интересов. Определённость в вопросе возможности урегулирования (разрешения) имеющегося конфликта интересов возможна только на основе количественной оценки основных факторов, формирующих уровенный режим как всего исследуемого участка р. Виллой, так и непосредственно в нижнем бьефе Вилуйских ГЭС-1, 2 у ГТС.

Проведённый комплекс исследований и полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Для актуальных условий эксплуатации Вилуйского водохранилища (включая современное положение кривой зависимости уровней воды в нижнем бьефе гидроузла от сбросных расходов воды, а также требования АО «СО ЕЭС» к режимам работы водохранилища в связи с присоединением Западного района электроэнергетической системы Республики Саха (Якутия) к Единой энергетической системе России с включением на параллельную работу с Объединённой энергосистемой Востока) соблюдение критерия К1 для каждого года не выполняется. В многолетнем разрезе несоблюдение критерия К1 наблюдается для каждого 5-го года (то есть в 20 % случаев).

2. Создание Светлинского водохранилища с подъёмом уровня воды в нём до отметки 175,00 м БС-77 не повлияло на уровенный режим нижнего бьефа Вилуйских ГЭС-1, 2 у ГТС. При подпорном уровне воды Светлинского водохранилища 175,00 м БС-77 уровенный режим нижнего бьефа гидроузла Вилуйских ГЭС-1, 2 у ГТС формируется только в зависимости от величины суммарного сбросного расхода воды через створ гидроузла. Основным фактором, исключая влияние на уровенный режим в нижнем бьефе гидроузла Вилуйских ГЭС-1, 2 подъёма уровня воды Светлинского водохранилища до отметки 175,00 м БС-77, является наличие порогов на 5,5–8 км вниз по течению от створа гидроузла Вилуйских ГЭС-1, 2 с высокими отметками дна русловой части р. Виллой.

3. В существующих условиях (при отметке Светлинского водохранилища 175,00 м БС-77) определяющим фактором формирования уровенного режима в нижнем бьефе гидроузла Вилуйских ГЭС-1, 2 у гидротехнических сооружений является наличие бара, который существенным образом ухудшает условия уровенного режима нижнего бьефа гидроузла (у ГТС).

4. Выводы по пп. 1–3 позволяют заключить, что сложившаяся ситуация с угрозой растепления мёрзлой каменно-набросной упорной призмы плотины Вилуйских ГЭС-1, 2 не связана с заполнением Светлинского водохранилища до отметки 175,00 м БС-77.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Бакановичус Н.С., Лялина А.А., Лысова А.А.** Анализ уровенного режима р. Виллой на участке между гидроузлами Виллойских ГЭС-1, 2 и Светлинской ГЭС и выявление факторов его формирования // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2021. Т. 302. С. 80–90
2. **Бакановичус Н.С., Лялина А.А., Максимова А.А., Пучкарюс А.В.** Обоснование расчетных гидрологических характеристик боковой приточности на участке р. Виллой между гидроузлами Виллойских ГЭС-1, 2 и Светлинской ГЭС // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2023. Т. 308. С. 27–41.
3. **Прокофьев В.А.** Применение графического процессора для ускорения решения трёхмерных прикладных задач гидравлики открытых потоков // Математическое моделирование. 2017. Т. 29. № 8. С. 74–94.
4. **Prokofev V.** Multilayer open flow model: A simple pressure correction method for wave problems // International J. for Numerical Methods in Fluids. 2018. Vol. 86(8). P. 518–540.
5. **Прокофьев В.А.** Динамика размывов дна вблизи гидротехнических сооружений: 3D численная модель и её тестирование на референтных экспериментальных данных // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2019. Т. 293. С. 45–72.
6. **Инженерно-гидрографические работы на реке Виллой: заключительный отчёт по результатам проведения батиметрической съёмки /** ООО «Балтийская Гидрографическая компания. Санкт-Петербург, 2021. 36 с. № 20/106-2.

REFERENCES

1. Bakanovichus N.S., Lyalina A.A., Lysova A.A. Analysis of the level regime of the Vilyui river in the area between the hydropower installations of the Vilyui HEP-1, 2 and the Svetlinskaya HEP, and identification of the factors of formation thereof. *Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneeva – Proceedings of the VNIIG*. 2021;302:80-90. (In Russ.).
2. Bakanovichus N.S., Lyalina A.A., Maksimova A.A., Puchkoryus A.V. Substantiation of the calculated hydrological characteristics of the lateral inflow on the Vilyuy River section between the hydroelectric units of the Vilyuy HPP-1, 2 and the Svetlinskaya HPP. *Proceedings of the VNIIG*. 2023;308:27-41. (In Russ.).
3. Prokofyev V.A. GPU utilization for speed up the solution of the three-dimensional engineering tasks of open flows hydraulics. *Math. Models and Comp. Simulations*. 2017;29(8):74-94. (In Russ.).
4. Prokofev V. Multilayer open flow model: A simple pressure correction method for wave problems // *International J. for Numerical Methods in Fluids*. 2018;86(8): 518-540.
5. Prokofyev V.A. Dynamics of scour near hydraulic structures: 3D numeral model and its validation of the reference experimental data. *Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneeva – Proceedings of the VNIIG*. 2019;293:45-72. (In Russ.).
6. Engineering and hydrographic work on the Vilyuy River: final report on the results of the bathymetric survey. Saint Petersburg, 2021. 36 с. № 20/106-2. (In Russ.).

Информация об авторах

Н.С. Бакановичус – канд. техн. наук, зав. лабораторией;
А.А. Лялина – руководитель группы;
А.А. Максимова – ведущий инженер;
В.А. Прокофьев – канд. техн. наук, начальник отдела;
А.В. Пучкарюс – инженер 2 категории;
Д.Д. Тесленко – ведущий инженер.

Information about the authors

N.S. Bakanovichus – Cand. Sci. (Techn.), Head of Laboratory;

A.A. Lyalina – Group Leader;

A.A. Maksimova – Lead Engineer;

V.A. Prokofyev – Cand. Sci. (Techn.), Department head;

A.V. Puchkaryus – Engineer, category 2;

D.D. Teslenko – Lead Engineer.

Статья поступила в редакцию 10.08.2023; одобрена после рецензирования 16.08.2023; принята к публикации 20.12.2023.

The article was submitted 10.08.2023; approved after reviewing 16.08.2023; accepted for publication 20.12.2023.

Научная статья
УДК 626/627.001.57

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МАКСИМАЛЬНЫХ ПРИДОННЫХ СКОРОСТЕЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СТРУЙ ОТ ВИНТОВ СУДНА

Виталий Иванович Климович¹, Роман Олегович Яковлев²

^{1,2} АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», Санкт-Петербург, Россия,

¹ KlimovichVI@vniig.ru

² YakovlevRO@vniig.ru

Аннотация. В статье приведены результаты экспериментальных исследований по определению максимальных придонных скоростей при работающих винтах танкера типа Arc7 в зоне причальных сооружений. Эксперименты проводились как без ГТС, так и при наличии ГТС гравитационного типа. Кормовая часть танкера была изготовлена с помощью 3D принтеров. Полученные экспериментальные данные сопоставлены с результатами, получаемыми с помощью расчетных методик.

Ключевые слова: танкер, аzipод, корма, гидротехническое сооружение, масштаб модели, придонная скорость, глубина воды, датчик скорости

Для цитирования: Климович В.И., Яковлев Р.О. Экспериментальные исследования максимальных придонных скоростей при воздействии струй от винтов судна // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2023. Т. 310. С. 17–32.

Original article

EXPERIMENTAL STUDIES MAXIMUM BOTTOM VELOCITIES AT INFLUENCE OF JETS FROM THE SHIP'S PROPELLERS

Vitaly I. Klimovich¹, Roman O. Yakovlev²

^{1,2} JSC «Vedeneev VNIIG», Saint Petersburg, Russia

¹ KlimovichVI@vniig.ru

² YakovlevRO@vniig.ru

Annotation. The article presents the results of experimental studies to determine the maximum bottom speeds with working propellers of an Arc7 tanker in the area of berthing facilities. The experiments were carried out both without hydraulic structures and in the presence of gravity-type hydraulic structures. The aft part of the tanker was made using 3D printers. The obtained experimental data are compared with the results obtained using calculation methodologies.

Key words: tanker, azipod, aft, hydraulic structure, model scale, bottom velocity, water depth, speed sensor

For citation: Klimovich V.I., Yakovlev R.O. Experimental studies maximum bottom velocities at influence of jets from the ship's propellers. *Proceedings of the VNIIG*. 2023;310:17-32. (In Russ.).

Освоение отечественных природных ресурсов арктического шельфа и строительство портовой инфраструктуры для Северного морского пути

в настоящее время являются актуальными направлениями строительства морских гидротехнических сооружений (ГТС). Суровые зимние и тяжелые ледовые условия в арктической зоне требуют использования судов арктического класса, способных самостоятельно перемещаться и швартоваться при наличии льда. Осадка больших танкеров класса Arc7, перевозящих сжиженный природный газ, может достигать 11–12 м. Эти танкеры могут иметь несколько движительных установок значительной мощности. Расчетная глубина воды вблизи причальных сооружений при принятых нормативных подходах может составлять 13–14 м. Поэтому, несмотря на принятые ограничения [1], вблизи причальных сооружений на мощность, передаваемую на движительные установки судна, скорость потока от струй работающих винтов больших танкеров может достигать значений 3–4 м/с вблизи дна. При таких придонных скоростях потока незащищенное дно вблизи причальных сооружений будет размываться, безопасность портовых сооружений не будет обеспечена, и в связи с этим возникает вопрос о защите дна от размыва. Чтобы разработать конструкцию защиты от размыва необходимо иметь данные о придонных скоростях потока от струй работающих винтов судна. Наиболее обоснованные и доступные для проектирования портовых ГТС расчетные методики определения скоростей потока и зон максимального воздействия на дно от работающих винтов судна содержатся в работе [1]. Однако, результаты [1] для группы винтов представляются спорными, так как при этом не учитывается расстояние между винтами. В работах [2–6] представлены результаты экспериментальных исследований скоростей потока от работающих винтов судна. В работах [7–15] представлены результаты численного моделирования потока от работающих винтов судна. Отметим, что численное решение является достаточно сложной задачей, зачастую определяется в упрощенной постановке и требует дополнительной экспериментальной верификации. Данная работа посвящена экспериментальному исследованию максимальных придонных скоростей от работающих винтов танкера ледового класса, который в качестве движителей имеет 3 азипода, а также исследованию геометрических характеристик зон максимального воздействия на дно. Эксперименты проводились как без ГТС, так и при наличии ГТС гравитационного типа с вертикальными стенками. Полученные экспериментальные данные сопоставлены с результатами, полученными с помощью расчетных методик [1, 16].

Исследования проводились в бассейне размером 15×30 м, масштаб моделирования был выбран 1:25 ($m=25$). В качестве судна рассматривался танкер класса Arc7, у которого в качестве движителей в кормовой части располагались 3 азипода с максимальной мощностью 15 МВт каждый. Для выполнения работы требовалось изготовить модель кормы танкера, так как предварительные расчеты по методикам [1, 17] показали, что влияние кормовой части может быть значительным при определенных направлениях работы азиподов. Кроме этого, в качестве судовых движителей танкера использовались электрические лодочные моторы Haswing Osarian 30 мощностью ~310 Вт с винтом диаметром 9 дюймов (рис. 1).

Для плавной регулировки подачи мощности к лодочным моторам было разработано специальное электронное устройство, показанное на рис. 2.

Модель кормы танкера (примерно $\frac{1}{4}$ часть корпуса судна) изготавливалась из пластика с помощью 3D принтеров. Процесс сборки модели кормы танкера представлял собой склеивание в ряды деталей, напечатанных на 3D принтерах. Затем склеенные ряды собирались в исследовательском бассейне в полную модель кормы расчетного танкера. Процесс сборки показан на рис. 3–5.



Рис.1. Электрический лодочный мотор Haswing Osapian 30



Рис. 2. Устройство для плавной регулировки подачи мощности на электродвигатель лодочного мотора



Рис. 3. Склеивание отдельных рядов модели кормы танкера

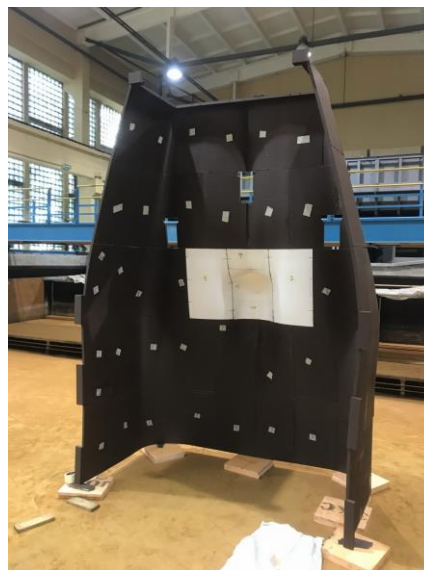


Рис. 4. Сборка отдельных рядов модели кормы танкера в исследовательском бассейне



Рис. 5. Модель кормы танкера с установленными лодочными моторами, размещенная на передвигаемой подставке с ножками регулируемой высоты

Расположение винтов производилось в соответствии с табл. 1 (нумерация винтов показана на рис. 9 – 10).

Направление вращения винтов № 2, № 3 – правое, направление вращения винта № 1 – левое.

Перед каждым тестом расположение винтов проверялось, также проверялась горизонтальность осей винтов и расположение осей винтов в одной горизонтальной плоскости (рис. 6).

Таблица 1

Исходные (натурные) данные по расположению винтов азиподов

Количество винтов, шт	3
Диаметр винта, м	5,5
Расстояние по вертикали от оси винта до днища расчетного судна, м	2,8
Угол оси винта относительно дна, град.	0
Расстояние от кормы до вертикальной оси винта азипода № 1, м	25,0
Расстояние от центральной плоскости судна до вертикальной оси винта азипода № 1, м	16,4
Расстояние от вертикальной оси азипода до лопастей винта № 1, м	3,8
Расстояние от кормы до вертикальной оси винта азипода № 2, м	16,5
Расстояние от центральной плоскости судна до вертикальной оси винта азипода № 2, м	0
Расстояние от вертикальной оси азипода до лопастей винта № 2, м	3,8
Расстояние от кормы до вертикальной оси винта азипода № 3, м	25,0
Расстояние от центральной плоскости судна до вертикальной оси винта азипода № 3, м	16,4
Расстояние от вертикальной оси азипода до лопастей винта № 3, м	3,8



Рис. 6. Проверка горизонтальности расположения осей винтов

Глубина воды в волновом бассейне измерялась с помощью двух датчиков уровня, цифровая индикация от которых была выведена на пульт управления волновым стендом (рис. 7). Точность установки глубины воды в бассейне составляла 1 мм.

При определении зон максимального воздействия от струй работающих винтов использовался датчик скорости MiniWater20Micro (производства Omni Instruments). С помощью указанного датчика скорости измеря-

лась придонная скорость потока в основном горизонтальном направлении на расстоянии 5–7 мм от дна. Вид датчика скорости MiniWater20Micro показан на рис. 8. Интервал осреднения был выбран равным 12 с. Точность определения скорости датчиком MiniWater20Micro составляла 3 %.

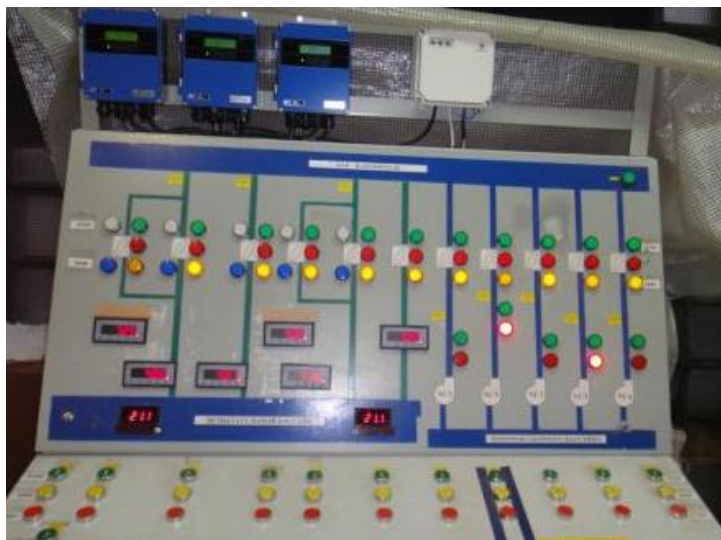


Рис. 7. Пульта управления бассейном

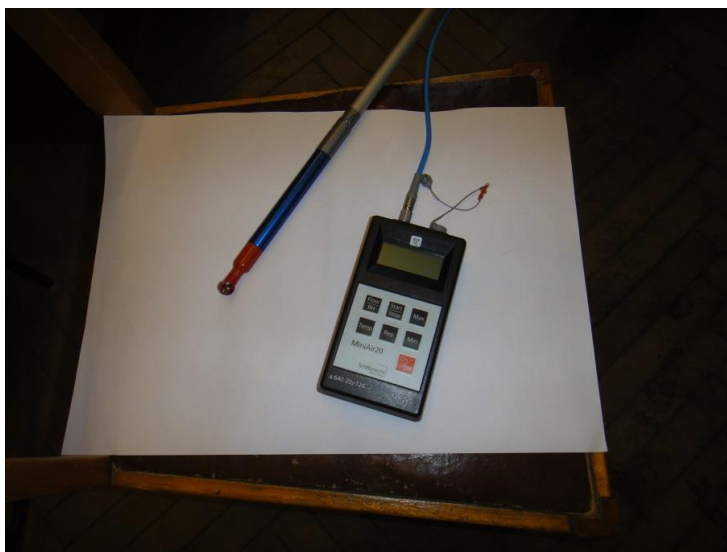


Рис. 8. Датчик скорости MiniWater20Micro

Исходные данные для проведения экспериментальных исследований приведены в табл. 2.

Моделирование гидродинамических характеристик проводилось согласно классическим подходам на основе подобия критерия Фруда. Все линейные размеры моделей, а также глубина изменялись пропорционально выбранному линейному масштабу моделирования $1/m$ ($m=25$). Временные характеристики изменялись пропорционально масштабу $1/(m^{1/2})$.

Таблица 2

Исходные (натурные) данные для проведения экспериментальных исследований

Глубина воды, м	13,68
Осадка судна, м	12,0
Ограничение по мощности, передаваемой на движительную установку вблизи причальных сооружений, МВт	2,0
Ширина танкера, м	50,0
Длина танкера, м	300,0

Отметим, что при экспериментальных исследованиях числа Рейнольдса (Re) для случая воздействия струй от винтов движителей танкера на дно (V_{bot} – придонная скорость струй от винтов двигателей; D – характерный размер (диаметр винта); ν – кинематическая вязкость жидкости)

$$Re = \frac{V_{bot} D}{\nu},$$

имеют значения в диапазоне 10^4 – 10^5 , что соответствует автомодельной области.

Первая группа тестов

Основной целью выполнения первой группы тестов являлось определение зоны максимального воздействия на дно и значения максимальной придонной скорости потока от работающих винтов танкера при отсутствии ГТС. Полученные экспериментальные значения указанных выше параметров сопоставлялись с данными, полученными по известным методикам [1, 16].

Тесты проводились для двух положений винтов относительно танкера: оси вращения винтов направлены вдоль оси танкера (рис. 9); оси вращения винтов направлены перпендикулярно оси танкера (рис. 10).

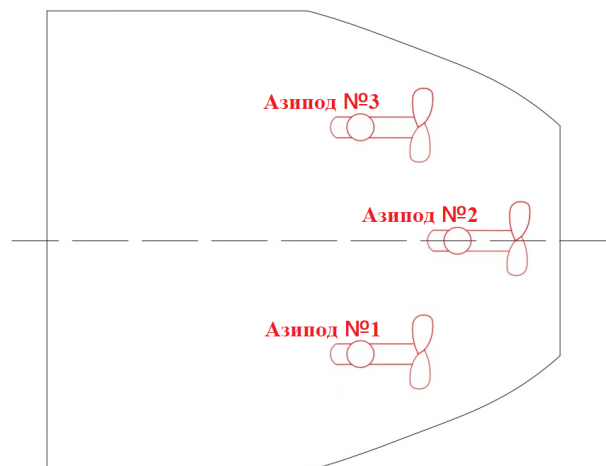


Рис. 9. Схема расположения осей вращения винтов вдоль оси танкера (схема 1)

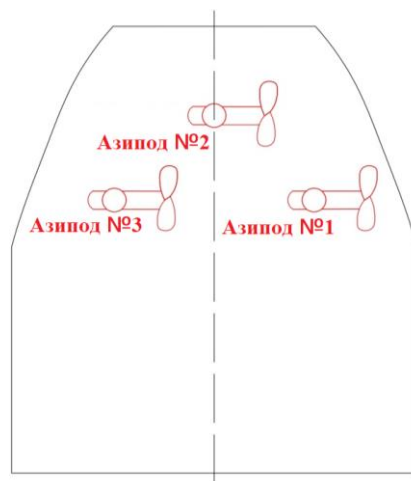


Рис. 10. Схема расположения осей вращения винтов перпендикулярно оси танкера (схема 2)

Расположение модели кормы танкера во время проведения тестов первой группы для двух схем расположения винтов показаны на рис. 11–12.

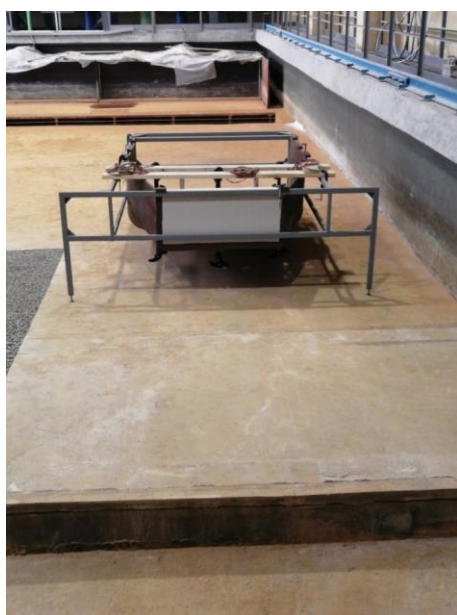


Рис. 11. Расположение модели кормы танкера по схеме 1 во время проведения тестов первой группы



Рис. 12. Расположение модели кормы танкера по схеме 2 во время проведения тестов первой группы

Для случая, когда оси вращения винтов направлены вдоль оси танкера (схема 1), был проведен тест для одного работающего винта при различной мощности, подаваемой на движитель. Результаты этого теста (в пересчете на натурные данные) приведены в табл. 3

Для случая, когда оси вращения винтов направлены перпендикулярно оси танкера (схема 2), получены результаты, представленные в табл. 4.

Были выполнены два теста: для работающего винта № 1 и для работающего винта № 2 (см. рис. 10).

Таблица 3

Результаты экспериментальных исследований при одном работающем винте (схема 1)

Работающий винт	Винт № 1		
N , МВт	2	4	8
$V_{b,max}$, м/с	2,3	2,95	3,6
L_{max} , м	30,2	30,2	30,2

Примечание. L_{max} – расстояние от лопастной системы винта до зоны максимальных придонных скоростей ($V_{b,max}$).

Таблица 4

Результаты экспериментальных исследований при одном работающем винте (схема 2)

Работающий винт	Винт № 1	Винт № 2
N , МВт	2	2
$V_{b,max}$, м/с	2,3	2,3
L_{max} , м	30,2	30,2

Примечание. Обозначения те же, что в табл. 3.

Проведем сопоставление полученных экспериментальных результатов с данными методики [1] (German Method). Согласно [1] для случая струи от одного винта, ограниченной свободной поверхностью или дном (см. [1], стр. 74), значение расстояния от винта до зоны максимальной придонной скорости можно получить, приравнявая производную от придонной скорости (по расстоянию до винта) нулю

$$L_{max} = 8,6h_p,$$

где h_p – расстояние от оси вращения винта до дна.

Для случая свободной струи от одного винта (см. [1], стр. 73) значения расстояния от винта до зоны максимальной придонной скорости можно получить, приравнявая производную от придонной скорости (по расстоянию до винта) нулю

$$L_{max} = 6,66h_p.$$

Согласно табл. 1–2, имеем $h_p=4,48$ м. В случае свободной струи получаем $L_{max}=29,85$ м, в случае ограниченной струи получаем $L_{max}=38,5$ м. При этом значение максимальной придонной скорости для свободной струи $V_{b,max}=1,71$ м/с, для ограниченной струи $V_{b,max}=2,02$ м/с при мощности $N=2$ МВт.

Отличие экспериментальных данных от данных [1] по определению L_{max} для случая работы одного винта (случай струи, ограниченной свободной поверхностью или дном) можно объяснить тем, что область применения для этого случая соотношений из [1] должна находиться на значитель-

ном расстоянии от зоны соприкосновения с дном струей от винта. В то же время для случая свободной струи мы имеем хорошее согласование полученных экспериментальных данных по определению L_{\max} с данными [1].

Согласно [1], значение L_{\max} от мощности, передаваемой на движитель одного винта, не зависит. Согласно табл. 3, аналогичный результат следует на основе данных экспериментальных исследований.

Согласно [1], значение $V_{b,\max}$ зависит от мощности, передаваемой на движитель одного винта, как $V_{b,\max} \sim N^{0,33}$. Согласно табл. 3, аналогичный результат следует на основе данных экспериментальных исследований.

Сопоставим полученные экспериментальные данные по значению максимальной придонной скорости $V_{b,\max}$ с методом Fuehrer M., Römisch (1977) [16, 18] по определению $V_{b,\max}$ для одного работающего винта. Согласно рис. 13, получаем $V_{b,\max} = 2,36$ м/с ($H_p/D_p=0,8$, $V_0=5,9$ м/с для $N=2$ Мвт), что хорошо согласуется с результатами экспериментальных исследований.

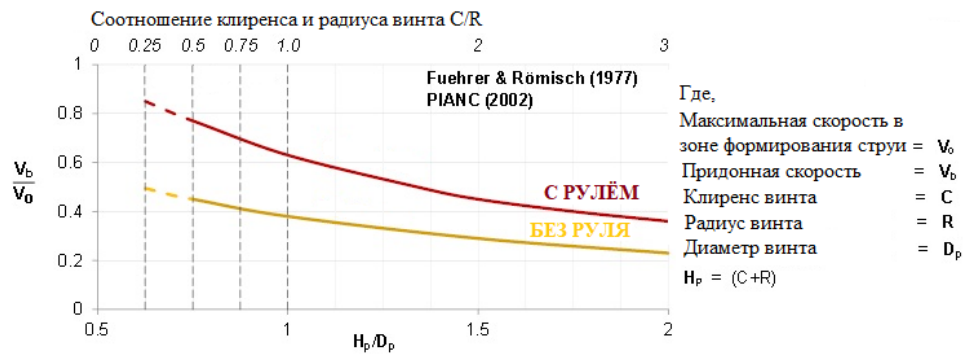


Рис. 13. Максимальная придонная скорость при работе винта судна

В табл. 5 приведены пересчитанные на натурные данные расстояния (L_{\max}) от винта № 2 до зон максимального воздействия и значения, измеренных осредненных по времени максимальных придонных скоростей ($V_{b,\max}$) при различной мощности, подаваемой на три движителя.

Таблица 5

Результаты экспериментальных исследований при работе трех винтов (схема 1)

Работающий винт	Винт №1	Винт № 2	Винт № 3
N , МВт	2	4	8
$V_{b,\max}$, м/с	2,2	2,80	3,45
L_{\max} , м	20,2	18,95	15,7
Расстояние от кормы танкера до зоны максимальных воздействий, м	7,5	6,25	3,0

В табл. 6 приведены пересчитанные на натурные данные измерений при трех работающих винтах для 2-й схемы расположения винтов (L_{\max} отсчитывается от лопастной системы винта № 1).

Таблица 6

**Результаты экспериментальных исследований при работе трех винтов
(схема 2)**

Работающий винт	Винт №1	Винт № 2	Винт № 3
N , МВт	2	4	8
$V_{b,max}$, м/с	2,25	2,95	3,65
L_{max} , м	27,0	27,0	27,0

Согласно результатам выполненных тестов при трех работающих винтах для рассмотренных направлений осей винтов значения максимальных придонных скоростей примерно соответствуют значению максимальной придонной скорости при работе одного винта. При этом положение зоны максимального воздействия при трех работающих винтах зависит от мощности, передаваемой на движители, для схемы 1 (см. рис. 9) и не зависит от мощности, передаваемой на движители, для схемы 2 (см. рис.10). Согласно [1], при трех работающих винтах максимальная придонная скорость должна быть увеличена в 1,73 раза по сравнению с одним работающим винтом. В данном случае расстояние между работающими винтами является значительным, что и объясняет отличие полученных результатов от данных [1].

Вторая группа тестов

Основной целью выполнения второй группы тестов являлось определение зоны максимального воздействия на дно и значения максимальной придонной скорости потока от работающих винтов танкера при наличии ГТС гравитационного типа.

На первом этапе исследований определялось расстояние от винтов до стенки ГТС гравитационного типа, при котором воздействие от винтов (придонная скорость у стенки ГТС) было максимальным. С этой целью проводились измерения придонной скорости у стенки ГТС при различных расстояниях от стенки ГТС до танкера. В качестве указанного выше расстояния было выбрано расстояние от лопастной системы винта № 3 (ближайшего к стенке ГТС) до стенки ГТС. Координата вдоль стенки (X) показана на рис. 14 и отсчитывалась от линии расположения винтов № 1 и № 3.

Общая длина модельной стенки ГТС в пересчете на натурные данные составляла 61 м. В результате проведенных измерений оказалось, что на расстоянии $L_{max}=18,3$ м наблюдается максимальная придонная скорость у стенки ГТС в точке с координатой $X=7,5$ м ($V_{b,max} = 2,7$ м/с). Измеренные осредненные по времени придонные скорости вдоль стенки (промежутки осреднения 12 с) при $L_{max}=18,3$ м приведены в табл. 7.

Таблица 7

Измеренные осредненные по времени придонные скорости вдоль стенки ГТС при $L_{max}=18,3$ м (в пересчете на натурные данные и с учетом направления)

X , м	-10	-5	0	2,5	5	7,5	10	12,5
$V_{b,max}$, м/с	-1,55	-1,6	-	+1,5	+2,25	+2,7	+2,6	+2,5

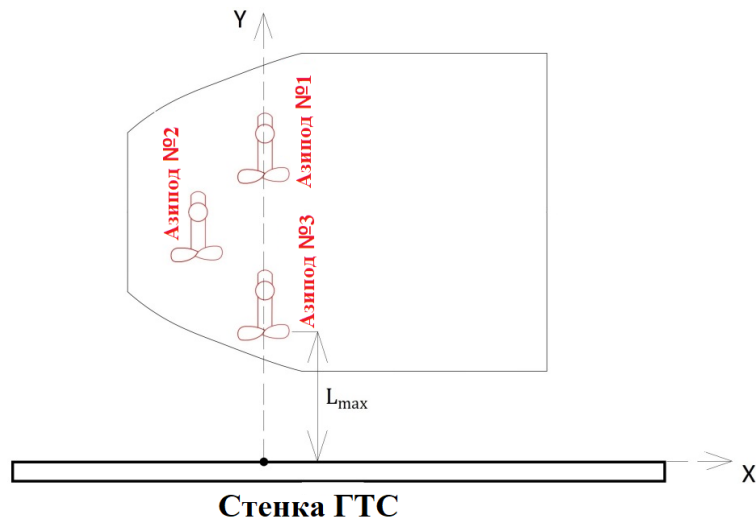


Рис. 14. Схема проведения теста по определению расстояния, при котором придонная скорость у стенки максимальна

На втором этапе проведения исследований определялась достаточность длины стенки для проведения тестов. В качестве критерия было принято, что при увеличении длины стенки приблизительно на 18–20 % максимальная придонная скорость не должна была изменяться более чем на 4–5 %. Длина модельной стенки была увеличена в пересчете на натурные условия на 10,8 м. Результаты измерений осредненных по времени придонных скоростей вдоль стенки при $L_{\max} = 18,3$ м с увеличенной длиной стенки приведены в табл. 8.

Таблица 8

Измеренные осредненные по времени придонные скорости вдоль стенки ГТС с увеличенной длиной при $L_{\max} = 18,3$ м (в пересчете на натурные данные и с учетом направления)

$X, \text{ м}$	-10	-5	0	2,5	5	7,5	10	12,5
$V_{b,\max}, \text{ м/с}$	-1,75	-1,4	-	+1,5	+2,3	+2,7	+2,6	+2,6

Таким образом, экспериментально была установлена достаточность длины модельной установки для обоснования полученных результатов по максимальной придонной скорости у ГТС гравитационного типа.

На рис. 15 показана модельная площадка для проведения теста со стенкой ГТС первоначальной длины 61 м, на рис. 16 – для проведения теста со стенкой ГТС, увеличенной до 71,8 м.

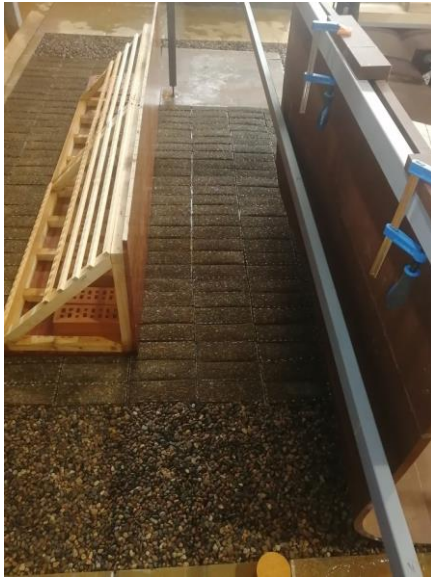


Рис. 15. Модельная площадка для проведения теста со стенкой ГТС первоначальной длины 61 м (в пересчете на натурные данные)



Рис. 16. Проведение теста со стенкой ГТС увеличенной длины до 71,8 м (в пересчете на натурные данные)

Заключение

1. Согласно результатам выполненных тестов при работе одного винта следует:

значения максимальных придонных скоростей при одном работающем винте для схем продольного и поперечного расположения винтов относительно средней линии танкера примерно совпадают;

расстояние от винта до зоны максимальных придонных скоростей не зависит от мощности, передаваемой на движитель;

значение максимальной придонной скорости $V_{b, \max}$ зависит от мощности N , передаваемой на движитель, как $V_{b, \max} \sim N^{0,33}$;

расстояние от винта до зоны максимальных придонных скоростей примерно соответствует его значению для случая свободной струи от одного винта;

значения максимальных придонных скоростей при одном работающем винте примерно соответствует его значению для случая ограниченной струи винта.

В целом основные полученные экспериментальные данные для тестов с одним работающим винтом согласуются с данными, получаемыми на основе методик [1, 16].

2. Согласно результатам выполненных тестов для рассмотренных направлений осей винтов азиподов значения максимальных придонных скоростей при трех работающих винтах танкера класса Arc7 примерно соответствуют значению максимальной придонной скорости при работе одного винта. Это обстоятельство объясняется значительным расстоянием между винтами азиподов. При этом положение зоны максимального

воздействия при трех работающих винтах зависит от мощности, передаваемой на движители, при направлении осей винтов вдоль средней линии танкера и не зависит от мощности, передаваемой на движители, при направлении осей винтов перпендикулярно средней линии танкера.

3. При наличии ГТС гравитационного типа экспериментально установлено, что зона максимального воздействия на дно у вертикальной стенки ГТС находится на расстоянии 18,3 м от лопастной системы ближайшего к стенке винта и значения максимальной придонной скорости потока от трех работающих винтов танкера на 20 % превышают значение максимальной скорости при отсутствии ГТС. Эксперименты при наличии ОГТ проводились с учетом ограничения на мощность в 2 МВт, подаваемую на движительные установки. Для обоснования полученных результатов по максимальной придонной скорости у ГТС гравитационного типа была установлена достаточность выбранной длины стенки ГТС.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Guidelines** for protecting berthing structures from scour caused by ships. PIANC. Report 180. 2015. 147 p.
2. **Berard N., Prasad S., Miller B., Deiber M.** Physical modelling of propeller scour on an armoured slope // PIANC-World Congress Panama City. Panama. 2018.
3. **Nunez-Gonzalez F., Koll K., Spitzer D.** Experimental study of the velocity field induced by a propeller jet in an inland-ship model and the related bed scour // *E3S Web of Conferences*. River Flow, 2018.
4. **Lam W., Hamill G., Robinson D., Raghunathan S., Song Y.** Analysis of the 3d zone of flow establishment from a ship's propeller // *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2012. p. 465-477.
5. **Hamill G., Kee C., Ryan D.** 3D Efflux Velocity Characteristics of Marine Propeller Jets // Proceedings of the ICE - Maritime Engineering, 2015. p. 62-75.
6. **Mujal-Colilles A., Gironella X., Crespo A.J.C., Sanchez-Arcilla A.** Study of the Bed Velocity Induced by Twin Propellers // *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.* 2017.
7. **Лобачев М.П., Пустошный А.В., Сазонов К.Е., Чичерин И.А.** Численное моделирование взаимодействия струи от винта с грунтом // Сборник научных трудов «Фундаментальная и прикладная гидрофизика». 2008. № 1. С. 88-98.
8. **Mei Z., Gao B., Zhang N., Lai Y., Li G.** Numerical Study on the Unsteady Flow Field Characteristics of a Podded Propulsor Based on DDES Method // *Energies*. 2022.
9. **Zhao D., Guo C., Lin J., Zhang Z., Bai X.** Prediction of Self-Propulsion Performance of Ship Model with Double L-Type Podded Propulsors and Conversion Method for Full-Scale Ship // *J. Mar. Sci. Eng.* 2019.
10. **He L., Kinnas S.A.** Numerical simulation of unsteady propeller/rudder interaction // *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering* 9. 2017.
11. **Muscari R., Mascio A. Di** Numerical simulation of the flow past a rotating propeller behind a hull // Second International Symposium on Marine Propulsors smp'11, Hamburg, Germany. 2011.
12. **Sanchez Caja A., Martio J., Saisto I., Siikonen T.** On the enhancement of coupling potential flow models to RANS solvers for the prediction of propeller effective wakes // *Journal of Marine Science and Technology*. 2015.
13. **Leschka S., Xu B., Yde L., Stoschek O., Best J.** Numerical Modelling of Propeller-Induced Flow Velocities on Embankments // 4th MASHCON. Hamburg. 2016.

14. **Sanchez-Caja A., Martio J., Viitanen V.M., Siikonen T.** Simulation of turbulent effective wakes for propellers in off- design conditions by a correction factor approach // *Journal of Marine Science and Technology*. 2021.
15. **Yang Y., Veldhuis L.L.M., Eitelberg G.** Numerical analysis of propeller induced ground vortices by actuator disk model // *Journal of Visualization*. 2017.
16. **Führer M., Römisch.** Effects of Modern Ship Traffic on Inland and Ocean Waterways // 24th International Navigation Congress, PIANC, Leningrad – Russia, 1977. p. 236-244.
17. **Беляев Н.Д., Климович В.И.** Современное состояние проблемы защиты дна от размывов, вызванных работой судовых движителей // *Гидротехническое строительство*. 2019. № 2. С.7-16.
18. **Hawkswood M., Flierman M., Haan R. De, King M., Groom J.** Propeller action and berth scour protection // PIANC – COPEDEC IX, Rio de Janeiro. Brasil. 2016.

REFERENCES

1. Guidelines for protecting berthing structures from scour caused by ships. PIANC. Report 180. 2015. 147 p.
2. Berard N., Prasad S., Miller B., Deiber M. Physical modelling of propeller scour on an armoured slope // PIANC-World Congress Panama City. Panama. 2018.
3. Nunez-Gonzalez F., Koll K., Spitzer D. Experimental study of the velocity field induced by a propeller jet in an inland-ship model and the related bed scour // *E3S Web of Conferences*. River Flow, 2018.
4. Lam W., Hamill G., Robinson D., Raghunathan S., Song Y. Analysis of the 3d zone of flow establishment from a ship's propeller // *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2012. 465-477 p..
5. Hamill G., Kee C., Ryan D. 3D Efflux Velocity Characteristics of Marine Propeller Jets // *Proceedings of the ICE - Maritime Engineering*, 2015. 62-75 p.
6. Mujal-Colilles A., Gironella X., Crespo A.J.C., Sanchez-Arcilla A. Study of the Bed Velocity Induced by Twin Propellers // *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.* 2017.
7. Lobachev M.P, Poustoshny A.V., Sazonov K.E., Tchicherin I.A. Numerical simulation of propeller wake interactions with the bottom soil // *Sbornik nauchnykh trudov «Fundamental and Applied Hydrophysics»*. 2008; 1:88-98. (In Russ.).
8. Mei Z., Gao B., Zhang N., Lai Y., Li G. Numerical Study on the Unsteady Flow Field Characteristics of a Podded Propulsor Based on DDES Method // *Energies*. 2022.
9. Zhao D., Guo C., Lin J., Zhang Z., Bai X. Prediction of Self-Propulsion Performance of Ship Model with Double L-Type Podded Propulsors and Conversion Method for Full-Scale Ship // *J. Mar. Sci. Eng.* 2019.
10. He L., Kinnas S.A. Numerical simulation of unsteady propeller/rudder interaction // *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering* 9. 2017.
11. Muscari R., Mascio A. Di Numerical simulation of the flow past a rotating propeller behind a hull // *Second International Symposium on Marine Propulsors smp'11, Hamburg, Germany*. 2011.
12. Sanchez Caja A., Martio J., Saisto I., Siikonen T. On the enhancement of coupling potential flow models to RANS solvers for the prediction of propeller effective wakes // *Journal of Marine Science and Technology*. 2015.
13. Leschka S., Xu B., Yde L., Stoschek O., Best J. Numerical Modelling of Propeller-Induced Flow Velocities on Embankments // 4th MASHCON. Hamburg. 2016.
14. Sanchez-Caja A., Martio J., Viitanen V.M., Siikonen T. Simulation of turbulent effective wakes for propellers in off- design conditions by a correction factor approach // *Journal of Marine Science and Technology*. 2021.

15. Yang Y., Veldhuis L.L.M., Eitelberg G. Numerical analysis of propeller induced ground vortices by actuator disk model // Journal of Visualization. 2017.

16. Führer M., Römisch. Effects of Modern Ship Traffic on Inland and Ocean Waterways // 24th International Navigation Congress, PIANC, Leningrad – Russia, 1977. 236-244 p.

17. Belyaev N.D., Klimovich V.I. The current state of the problem of protecting the bottom from erosion caused by the work of ship propellers. *Gidrotekhnicheskoye stroitel'stvo – Power Technology and Engineering*. 2019;2:7-16. (In Russ.).

18. Hawkswood M., Flierman M., Haan R. De, King M., Groom J. Propeller action and berth scour protection // PIANC – COPEDEC IX, Rio de Janeiro. Brasil. 2016.

Информация об авторах

В.И. Климович – доктор физ.-мат. наук;

Р.О. Яковлев – инженер.

Information about the authors

V.I. Klimovich – Dr. Sci. (Phys.-Math.);

R.O. Yakovlev – Engineer.

Статья поступила в редакцию 02.10.2023; одобрена после рецензирования 13.10.2023; принята к публикации 20.12.2023.

The article was submitted 02.10.2022; approved after reviewing 13.10.2023; accepted for publication 20.12.2023.

Научная статья
УДК 626/627.03.059

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ IV КЛАССА ПОСЛЕ МНОГОЛЕТНЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ И АНАЛИЗ ВОЗМОЖНЫХ ПОСЛЕДСТВИЙ В РЕЗУЛЬТАТЕ АВАРИИ

**Лариса Сергеевна Дейнеко (Василевская)¹, Андрей Викторович
Дейнеко², Екатерина Алексеевна Антясова³**

¹ ООО «МНИПИИТИ», ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, Москва, Россия

² ООО «Сигма Тау», Москва, Россия

³ БКП АО «Трансинжстрой», Москва, Россия

¹ larissa-ser@yandex.ru

² deyneko@sigma-tau.xyz

³ eantyasova@bk.ru

Аннотация. В настоящее время более 7 тыс. гидротехнических сооружений (ГТС) в России считаются бесхозными, свыше 1 тыс. находятся в аварийном состоянии. Согласно статье 5 Федерального закона № 117-ФЗ от 21.07.1997 «О безопасности гидротехнических сооружений» органы исполнительной власти субъектов Российской Федерации обеспечивают безопасность этих сооружений. На практике собственность передается муниципалитетам, которые постепенно ставят ГТС на учет в Российский регистр. Необходимо создать единую базу бесхозных ГТС и осуществлять контроль за их техническим состоянием и процессом окончательной передачи этих сооружений в собственность.

Ключевые слова: *обследование ГТС, оценка состояния ГТС, бесхозные ГТС, безопасность ГТС, расчет вероятного вреда*

Для цитирования: Дейнеко Л.С., Дейнеко А.В., Антясова Е.А. Оценка состояния гидротехнических сооружений IV класса после многолетней эксплуатации и анализ возможных последствий в результате аварии // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2023. Т. 310. С. 33–46.

Original article

ASSESSMENT OF THE CONDITION OF CLASS IV HYDRAULIC STRUCTURES AFTER MANY YEARS OF OPERATION AND ANALYSIS OF POSSIBLE CONSEQUENCES AS A RESULT OF AN ACCIDENT

**Larisa S. Deineko (Vasilevskaya)¹, Andrei V. Deineko²,
Ekaterina A. Antyasova³**

¹ LLC «Moscow research, design and survey institute of technologies and innovations»,

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia,

² LLC «Sigma Tau», Moscow, Russia

³ BKP JSC «Transinzhstroy», Moscow, Russia

¹ larissa-ser@yandex.ru

² deyneko@sigma-tau.xyz

³ eantyasova@bk.ru

Abstract. Currently, more than 7,000 hydraulic structures in Russia are considered ownerless, more than 1,000 are in disrepair. According to Article 5 of the Federal Law No. 117-FZ dated 21.07.1997 “On the Safety of Hydraulic Structures”, the executive authorities of the subjects of the Russian Federation ensure the safety of these structures. In practice, ownership is transferred to municipalities, which gradually register the hydraulic structure in the Russian Register. It is necessary to create a unified database of ownerless hydraulic structures to monitor their technical condition and the process of the final transfer of these structures to ownership.

Keywords: inspection of hydraulic structures, assessment of the condition of hydraulic structures, ownerless hydraulic structures, safety of hydraulic structures, calculation of probable damage

For citation: Deineko L.S., Deineko A.V., Antyasova E.A. Assessment of the condition of class IV hydraulic structures after many years of operation and analysis of possible consequences as a result of an accident. *Proceedings of the VNIIG*. 2023;310:33-46. (In Russ.).

Комплекс гидротехнических сооружений (ГТС) – это часть инфраструктуры территории, от состояния которой зависят многие аспекты жизнедеятельности и функционирование объектов экономики [1]. Поэтому большинство ГТС находятся в густонаселенных районах, промышленных зонах и в районах с развитой инфраструктурой, либо инфраструктура со временем развивалась вблизи этих ГТС.

Одновременно ГТС являются объектами потенциальной опасности для населения и окружающей среды, так как аварии могут сопровождаться тяжелыми последствиями: гибелью людей, разрушением жилищ, разрушением объектов экономики, нарушением экосистем, а также полной или частичной утратой ГТС и водохранилищ как объектов хозяйственной деятельности [1]. В связи с чем оценка состояния ГТС после многолетней эксплуатации и анализ возможных последствий в результате аварии являются важной и актуальной задачей.

Класс ГТС назначается согласно критериям классификации, утвержденным Постановлением Правительства РФ [2], а также согласно приложению Б СП 58.13330.2019 [3]. Нормами предусмотрено четыре класса ГТС от I до IV соответственно по порядку понижения уровня ответственности.

В основу проектирования и эксплуатации ГТС положен вероятностный подход по поддержанию риска аварии ГТС на научно-обоснованном уровне, который принимается в зависимости от класса ГТС согласно таблице.

**Допускаемые значения вероятностей возникновения аварий
на напорных ГТС**

Класс ГТС	Вероятность аварии ГТС, год ⁻¹
I	$5 \cdot 10^{-5}$
II	$5 \cdot 10^{-4}$
III	$2,5 \cdot 10^{-3}$
IV	$5 \cdot 10^{-3}$

Критерии классификации ГТС учитывают их назначение, высоту, напор, тип грунтов основания, тип территории. К примеру, к IV классу могут быть отнесены грунтовые плотины мелиоративного назначения высотой до 15–20 м при объеме водохранилища до 50 млн м³.

На селитебных территориях и в зоне расположения крупных объектов экономики напор ограничивается 2–10 м, что зависит от плотности жилого фонда, годового объема производства и стоимости одновременно хранящейся продукции.

Ключевое значение для отнесения ГТС к IV классу имеет оценка вероятного вреда людям: не должны пострадать постоянно проживающие люди и не должны быть нарушены условия их жизнедеятельности.

ГТС IV класса представляют собой самые массовые ГТС. По данным на 2022 г. под федеральным государственным надзором в области безопасности ГТС находилось 23 374 комплекса ГТС. Из них 18 172 ГТС IV класса, то есть 78 % (рис. 1).

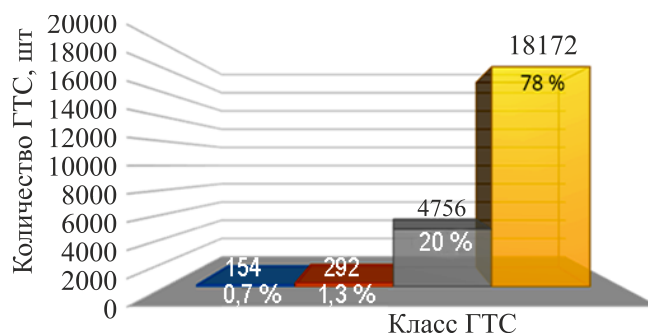


Рис. 1. Распределение гидротехнических сооружений, поднадзорных Ростехнадзору, по классам:
 ■ – I класс; ■ – II класс; ■ – III класс; ■ – IV класс

В силу исключительно большого количества ГТС IV класса и сравнительно высокой нормативной вероятности аварии на них, работы по повышению безопасности ГТС IV класса имеют высокую актуальность и практическую значимость, так как направлены на уменьшение количества происходящих аварий и снижение экономического ущерба от них. К указанным работам можно отнести декларирование безопасности ГТС, в рамках которого проводятся обследование ГТС и расчет вероятного вреда при аварии.

Основным способом обеспечения надежной и безопасной эксплуатации ГТС является мониторинг, то есть регулярный контроль за состоянием ГТС, а также действующими на него природными и техногенными нагрузками и воздействиями. Согласно ст. 9 Федерального закона № 117-ФЗ от 21.07.1997 «О безопасности гидротехнических сооружений» [4], обеспечение мониторинга является обязанностью собственника ГТС. Требования к мониторингу зависят от класса ГТС и условий эксплуатации.

На практике требования к мониторингу конкретизируются в разделе «Меры по обеспечению эксплуатационной надежности и безопасности ГТС» декларации безопасности ГТС [5]. В этом разделе предусматривается разработка проекта мониторинга безопасности ГТС, включающего информацию о режимах пропуска максимальных расходов воды основного и поверочного расчетных случаев. Для сооружений IV класса мониторинг включает регулярные визуальные и инструментальные наблюдения с характерной цикличностью два раза в год: весной, перед прохождением па-

водка для проверки готовности ГТС к эксплуатации в паводковый период, и осенью, для проверки состояния и подготовки ГТС к нормальной эксплуатации в осенне-зимний период.

Вместе с тем, по общему мнению, на многих ГТС IV класса, внесенных в Российский регистр ГТС [6], мониторинг остается формальностью, а на остальных – не производится вовсе. Такой подход не соответствует закону [4], по которому техническое состояние ГТС должно контролироваться.

При отсутствии мониторинга контроль за сооружением часто утрачивается полностью, потому что многие ГТС IV класса эксплуатируются без регулярного участия специалистов-гидротехников. Это делает возможным существование феномена бесхозных ГТС, которые работают без участия людей. Передача таких ГТС в собственность повышает безопасность их эксплуатации благодаря внедрению мер контроля (в силу обязательств, накладываемых на собственника законом), но не подразумевает изменение режима функционирования ГТС.

После получения прав собственности на ГТС, которое эксплуатировалось долгое время без контроля, новый собственник может столкнуться с рядом проблем. Один из примеров приведен на рис.2. После передачи ГТС в собственность местного муниципалитета администрация столкнулась с полным разрушением бетонной и частичной разборкой грунтовой плотины (местные жители использовали земляную дамбу в качестве карьера). В результате чрезвычайной ситуации ущерба не было: затопленными оказались лишь сельскохозяйственные угодья, которые также много лет не эксплуатировались. Таким образом, о разрушении ГТС узнали только в момент обследования в рамках оформления документации для составления декларации безопасности ГТС.

а)



б)



Рис. 2. ГТС IV класса в Московской области после длительной бесконтрольной эксплуатации:

а – бетонная водосливная плотина; *б* – грунтовая плотина

Бесконтрольной эксплуатации ГТС IV класса в определенной степени способствует ослабление законодательных требований. Так, в соответствии с измененной редакцией ст. 13 [4] с 2016 г. в отношении ГТС IV класса в рамках федерального государственного надзора в области безопасности ГТС плановые проверки не проводятся. Требования к циклично-

сти мониторинга не включены в нормативные документы федерального уровня, оставляя конкретизацию требований к мониторингу на решения в рамках декларации безопасности. Получается, что нет декларации безопасности – нет мониторинга – нет контроля за состоянием ГТС. Поэтому представляется целесообразным дополнить федеральные нормативные документы указанием, что мониторинг ГТС IV класса должен осуществляться не реже двух раз в год с выездом специалистов на объект, а минимальный объем мониторинга включает визуально-инструментальный контроль сооружений напорного фронта.

В контексте вопросов мониторинга необходимо обратить внимание на существенный прогресс доступных технологий в этой области, особенно на развитие автоматизированных видов мониторинга, которые позволяют значительно снизить риски аварий. Например, автоматизированное нивелирование [7], которое осуществляется постоянно в режиме реального времени, и в случае дестабилизации осадок выполняет тревожное оповещение по каналам связи (электронная почта, короткие сообщения SMS). Для ГТС IV класса автоматизированные виды мониторинга могут применяться при проведении на сооружениях или вблизи них строительных работ, а также в случае аварийного состояния ГТС в целях своевременного оповещения об угрозе прорыва напорного фронта.

Риски гидродинамических аварий на ГТС нельзя устранить полностью, в связи с чем необходима оценка возможных сценариев аварий, которые, к сожалению, продолжают отмечаться в истории гидротехники.

Современным примером могут служить гидродинамические аварии, произошедшие в 2012 г. в г. Крымске. Проливные дожди вызвали наводнение. Паводок разрушил плотины нескольких искусственных водоемов. В результате стихийного бедствия пострадали 34 тыс. человек.

В 2013 г. в результате разрушения ГТС были затоплены прибрежные улицы села Николо-Павловское Свердловской области. В 2023 г. масштаб ЧС увеличился: из-за прошедших ливневых дождей произошло разрушение каскада уже из 3-х ГТС на реках Шиловка и Шайтанка. В результате обрушены 3 моста, размыты 2 дороги. Отрезанными от административных центров и региональных дорог оказались около 15 тыс. человек.

В 2017 г. произошло разрушение ГТС водохранилищ Чэччимэ-Маралай и Юрюнг-Кюель с подтоплением жилого фонда населенных пунктов с. Мугудай и с. Юрюнг-Кюель в Якутии.

12 августа 2023 г. в результате проливных дождей и тайфуна «Ханун» разрушена дамба в г. Уссурийске Приморского края. Произошли масштабные затопления, разрушены дороги, социальные объекты, свыше 5000 домовладений.

В сентябре 2023 г. депутат Государственной Думы Сергей Миронов отметил: «ненадлежащее состояние гидрозщитных сооружений уже не в первый раз становится причиной масштабных ЧС. С этим связано и недавнее размытие БАМа в Бурятии, и разрушительное наводнение в Иркутской области в 2019 г. Мы видим, что даже в регионах с регулярными рисками наводнений проблема из года в год одна и та же, и она не решается. По экспертным оценкам, из тысяч объектов в стране не менее половины устарели. Регионы и муниципалитеты явно не справляются с этой проблемой, ее нужно решать централизованно. Необходима масштабная ревизия всех

ГТС в стране, тем более, что даже их точное количество до сих пор неизвестно. По ее итогам нужно запускать федеральную программу модернизации и строительства ГТС»[8].

При этом надо учитывать, что в рамках государственной программы «Воспроизводство и использование природных ресурсов» за 2022 г. завершен капитальный ремонт 32-х ГТС в 23-х регионах страны, что обеспечит защиту от паводков 12,8 тыс. человек. К концу 2023 г. планируют завершить ремонт на 100 ГТС в 44-х регионах [9].

В последние десятилетия, в силу ряда обстоятельств, а также экономического положения страны множество ГТС оказались бесхозными (не имеют собственника) и пришли в запустение. В настоящее время в России находятся в эксплуатации более 65 тыс. ГТС, при этом бесхозных из них порядка 11 %, а в неудовлетворительном или аварийном состоянии более 2 %. Большинство бесхозных ГТС – это грунтовые плотины прудов и водохранилищ мелиоративных и животноводческих комплексов, рыбохозяйств, противопожарных водоемов, а также иных водных объектов муниципального значения. Большинство из них являются сооружениями IV класса. Создавались они в большинстве случаев без разработки проекта или иной технической документации, хозяйственным способом, без постановки их на учет [10]. Ввиду отсутствия собственника и документации на такие ГТС систематический контроль за их техническим состоянием не осуществляется.

Распределение ГТС IV класса в зависимости от уровня безопасности представлено на рис. 3.

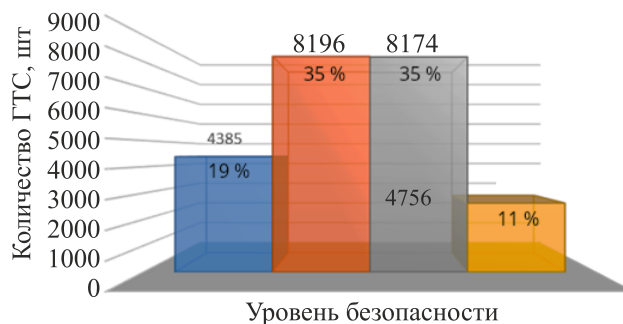


Рис. 3. Распределение ГТС IV класса, поднадзорных Ростехнадзору, в зависимости от уровня безопасности:
 ■ – нормальный; ■ – пониженный; ■ – неудовлетворительный; ■ – опасный

Ростехнадзором совместно с МЧС России и органами исполнительной власти субъектов Российской Федерации также осуществляется работа по снижению числа бесхозных ГТС, ведется база данных бесхозных ГТС, в которой по состоянию на 31 декабря 2022 г. зарегистрированы 2 640 бесхозных ГТС в 57 субъектах РФ. За 12 месяцев 2022 г. количество бесхозных ГТС сокращено на 776 единиц, вновь выявлено 480 бесхозных ГТС, общее количество бесхозных ГТС уменьшилось на 11 %.

Таким образом, системная проблема с бесхозным положением ГТС IV класса постепенно решается. Идет процесс передачи ГТС в муниципальную собственность, начато выделение средств из муниципальных

бюджетов на их ремонт и эксплуатацию. Одновременно в определенных регионах количество бесхозяйных ГТС может эпизодически увеличиваться, что вызвано работой по их выявлению.

Например, в Калмыкии в 2011 г. бесхозяйными ГТС считались лишь 5 сооружений из 189. В 2020 г. руководством республики было принято решение о реконструкции уже семи бесхозяйных ГТС, которые защищают населенные пункты и территорию Лаганского района от нагонных волн Каспийского моря. Данные сооружения находятся в ограниченно-работоспособном состоянии. Ненадлежащее состояние ГТС привело к подтоплению низлежащих территорий региона в 1995 и 2015 гг. Также в 2021 г. начат капитальный ремонт канала РР-1 Право-Егорлыкской обводнительно-оросительной системы, включающий 22 ГТС, в рамках федеральной целевой программы «Развитие мелиоративного комплекса России до 2024 года» [11].

Приведем актуальные примеры ремонтов ГТС IV класса, в том числе связанные с ликвидацией бесхозяйности. Рассмотрим каскад ГТС на р. Копнинке в городском округе Сергиев Посад Московской области.

Река Копнинка – правый приток р. Кончуры, главной реки Сергиева Посада. В настоящее время в пойме р. Копнинка образовано 5 прудов: Черный, Корни, озеро Загорское море, Банный и Келарский (рис. 4).

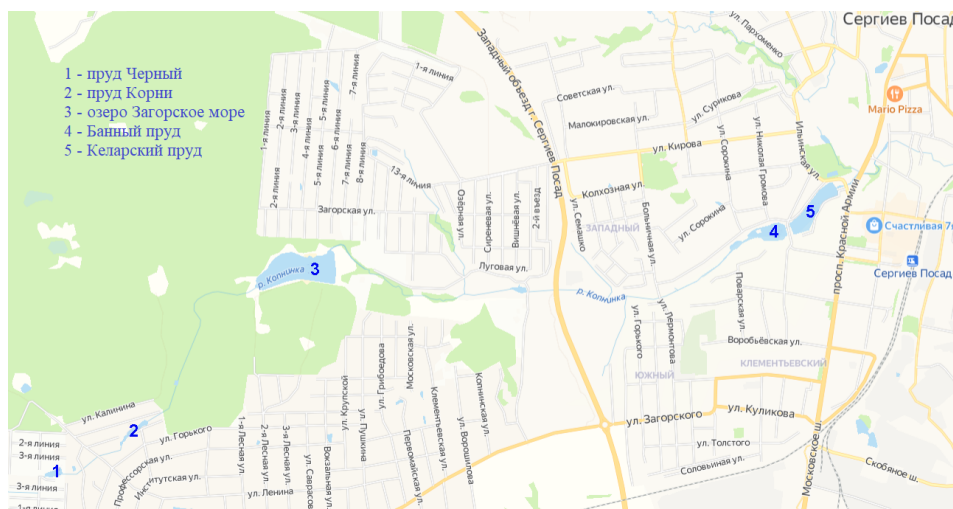


Рис. 4. Каскад прудов на р. Копнинка

Первый пруд – Черный – запружен на расстоянии 2 км от истока реки. Площадь зеркала пруда около 0,6 га.

Пруд Корни – второй пруд. Расстояние между створами около 500 м. Площадь зеркала пруда около 0,6 га.

Третий пруд на публичных картах обозначен как озеро Загорское море – является искусственным водоемом, эксплуатируемым с 1959 г. Площадь зеркала пруда около 10 га. Источник воды в пруду – родники, талые и дождевые воды. Длина пруда порядка 550 м. Расстояние между створами около 1,3 км. Данный пруд является противоэрозионным и предназначен для регулирования стока и рекреационных целей (рис. 5).



Рис. 5. ГТС плотины оз. Загорское море на р. Копнинке

Четвертый пруд – Банный – образован в XVI веке. Раньше носил название Клементьевский (по находящемуся вблизи Клементьевскому поселку). Многократно менял свои границы, очищался и заболачивался. В 1853 г. был спущен. В настоящее время Банный пруд — обширный заболоченный участок по берегам р. Копнинки, примыкающий с запада к Келарскому пруду [12]. Площадь зеркала пруда около 2,5 га. Расстояние между створами около 3,0 км.

Нижняя ступень каскада – Келарский пруд – пятый пруд, является искусственным водоемом, эксплуатируемым с середины XVI в. Расстояние между створами составляет около 30 м. Длина пруда порядка 400 м. Площадь зеркала пруда 3,6 га.

Келарский пруд – сердце города и излюбленное место отдыха местных жителей. Поэтому во все времена за прудом следили. История водоема начинается с 1552 г., когда келарь Андриан Ангелов устроил его для нужд монастыря, отсюда и название. За время своего существования с XVI века пруд менял назначение: от хозяйственного (для нужд монастыря и разведения рыбы) до культурно-досугового (рис. 6, а).

В состав ГТС Келарского пруда входят: грунтовая плотина длиной по гребню 90,0 м и максимальной высотой 3,5 м, водосброс автоматический со ступенчатым перепадом (ширина пролета 9,8 м) и донный водовыпуск ($\varnothing 1,0$ м) (рис. 6, б).

ГТС Келарского пруда расположены в 200 м от слияния рек Копнинки и Кончуры. Прежде, во время паводков, р. Кончура забивала шлаком бетонную трубу под железнодорожной насыпью. В результате течение меняло направление и переполненный Келарский пруд разливался. Крупное наводнение случилось 2 августа 1937 г. Несколько серьезных паводков были в 1960-х годах [13]. Противопаводковую систему установили лишь в 1980 г.

а)



б)



Рис. 6. Келарский пруд на реке Копнинке:
а – общий вид; б – ступенчатый водосброс

В 2019 г. проведено благоустройство прилегающей к пруду городской территории и самого ГТС.

На сегодняшний день все конструкции ГТС Келарского пруда находятся в работоспособном состоянии. Остальные пруды расположены дальше от центра города. Облагораживать и поддерживать Банный пруд стали совсем недавно.

Сейчас обсуждается благоустройство следующего пруда – озера Загорское море. Водоем был создан энтузиастами, жителями района Семхоз, инженерами-мелиораторами Михаилом Георгиевичем и Антониной Ивановной Волчковыми. Наполнение пруда началось в апреле 1959 г. Тогда местная печать констатировала: «Этот рукотворный водоем не только удивительно удачно вписался в окружающую местность, но по-настоящему ее облагородил, сделав одним из самых замечательных уголков района». Событие было названо в духе времени – «открытие искусственного водоема для отдыха загорчан – Загорского моря» [14].

Ввиду длительной эксплуатации и отсутствия надлежащего контроля ГТС озера Загорское море находятся в ограниченно-работоспособном состоянии и нуждаются в восстановлении для дальнейшей безопасной эксплуатации. Конструкции быстротока потеряли проектное положение (рис. 7, а). Откосы земляной плотины потеряли проектный уклон: у верхового откоса местами наблюдается подмыв, откосы поросли кустарниками и деревьями (рис. 5). Нижний бьеф заболочен. По гребню плотины проходит дорога, выложенная железобетонными дорожными плитами. Часть плит отсутствует или находится под слоем грунта (рис. 7, б). Плиты не соответствуют типовым размерам. Износ плит составляет около 40 %.

Основным документом, подтверждающим безопасность ГТС, служит декларация безопасности. Одно из приложений к декларации – расчет вероятного вреда, который может быть причинен жизни, здоровью физических лиц, имуществу физических и юридических лиц в результате аварии ГТС. Целью расчета является установление размера вероятного вреда при возможном возникновении аварии на ГТС. Его количественная оценка основана на принятых в гражданском праве принципах защиты прав собственника и полного возмещения убытков, возникших по вине юридических или физических лиц [15]. Общими факторами, определяющими размер вероятного вреда, являются:

а)



б)



Рис. 7. ГТС Плотина озера Загорское море:
а – быстроток, б – дорога по гребню плотины

социальный ущерб;
ущерб элементам транспорта и связи;
ущерб жилому фонду и имуществу граждан;
расходы на ликвидацию последствий аварии;
ущерб природной среде.

На основании СТП ВНИИГ 210.02.НГ-04 [16] сравнительный анализ возможных аварий для ГТС Келарского пруда и оз. Загорское море показал, что уровень безопасности [17] для обоих ГТС соответствует нормальному.

При возможных сценариях аварий на ГТС Келарского пруда в зону затопления попадают только коммуникационные кабели, проложенные в двух металлических трубах, расположенные в 35 м от створа плотины. В то же время в результате возможных ЧС на ГТС оз. Загорское море в зону затопления попадает ряд строений садоводческих некоммерческих товариществ.

Проект благоустройства оз. Загорское море акцентирует внимание на облагораживании прилегающей территории: создании зон для активности горожан, пляжей, пешеходных зон, лыжных трасс, организации подъездных дорог и автостоянок в рамках реализации государственной программы формирования современной и комфортной городской среды и программы благоустройства губернатора Московской области «Парки в лесу». Утверждение декларации безопасности сосредоточит внимание собственника на восстановлении ГТС с целью защиты населения и низлежащей территории в целом. Собственник в лице муниципалитета обеспечивает безопасную и надежную эксплуатацию ГТС. Такие собственники руководствуются всеми нормативными документами и оперативно исполняют предписания, выданные надзирающими органами (МЧС и Ростехнадзором) в ходе декларирования ГТС. При этом считается целесообразным проекты благоустройства прилегающих территорий разрабатывать с учетом состояния ГТС и рекомендаций по восстановлению и укреплению плотины.

Одним из примеров совмещения проекта благоустройства и реконструкции ГТС является пруд, называемый Малаховским озером в Люберецком городском округе Московской области. Водоем образован в результате строительства плотины на р. Македонке (Лебездонке) еще при Петре I, в первой половине XVIII века, для производственных нужд, а именно шпажного (палашного) завода (рис. 8, а) [18]. Современное ГТС Малахов-

ского озера построено в 1940 г. Длина грунтовой плотины 120 м, высота 5 м. В результате уровень реки поднялся на 2–2,5 м. Дальнейшее углубление в 1959 г. увеличило глубину до 5,0 м. В 1980-х годах площадь озера была расширена за счет добычи песка с берегов озера. Глубина варьируется от 2 до 6 м. Выше по течению расположен Вялковский пруд. Расстояние между створами 7,2 км. Площадь зеркала Малаховского озера 15 га. Источник воды – родники, талые и дождевые воды. Данный пруд является противозерозионным и предназначен для регулирования стока. Сброс воды в русло р. Македонка производится через открытый бетонный нерегулируемый поверхностный водослив, в настоящее время находящийся в аварийном состоянии. Согласно [2], ГТС Малаховского озера относятся к IV классу опасности. Откосы земляной плотины потеряли проектный уклон и поросли кустарниками и деревьями. Наблюдаются эрозийные процессы по берегам. Произошло сильное заиление, зарастание русла реки и загрязнение акватории в целом. Нижний бьеф заболочен.

В рамках государственной программы Московской области «Экология и окружающая среда Подмосковья» и региональной программы «100 прудов и озер» по результатам обследования в рамках декларирования ГТС с 2019 г. реализуется проект благоустройства зоны отдыха «Малаховское озеро», включающее в себя не только досуговые объекты прилегающей территории, но и восстановление ГТС, включая досыпку грунта на profile плотины, восстановление поверхностного водосброса, укрепление гребня и откосов, установку водомерной рейки и очистку всего озера с восстановлением р. Македонки (рис. 8, б).

Передача бесхозных ГТС местным муниципалитетам благотворно влияет на их состояние. При этом законодательная система далека от идеала и оставляет возможность контролировать состояние ГТС новым собственникам чисто формально, без затрат на ремонт сооружений. Хотя в большинстве случаев начата работа по обеспечению безопасной эксплуатации ГТС, включая проведение технического обследования ГТС, выполнение расчетов вероятного вреда при возможных авариях и разработку деклараций безопасности. Изложенное демонстрирует возможность приведения режима эксплуатации ГТС IV класса, находящихся в различном техническом состоянии, в соответствие с законодательными и нормативно-техническими требованиями.



Рис. 8. ГТС плотины Малаховского озера:
а – конец XIX – начало XX века; б – 2023 г.

Заключение

1. Около 11 % всех ГТС в стране – бесхозные. Согласно Федеральному закону № 117-ФЗ от 21.07.1997 «О безопасности гидротехнических сооружений» [4], органы исполнительной власти субъектов Российской Федерации должны обеспечивать безопасность ГТС, не имеющих собственника и находящихся на их территории. На деле не у всех исполнительных органов хватает средств для осуществления контроля за состоянием ГТС.

2. Ранее бесхозные ГТС передаются в управление местных муниципалитетов, что инициирует контроль за их состоянием. Тем не менее, при проведении ремонтов следует рекомендовать выполнять приоритизацию объектов по величине гидротехнических рисков, а не только по степени общественного внимания. Для обеспечения безопасной эксплуатации и восстановления ГТС необходимо руководствоваться разработанной документацией, входящей в декларации безопасности, и проводить регулярный мониторинг сооружений на постоянной основе.

3. Требования к цикличности мониторинга ГТС не включены в нормативные документы федерального уровня и определяются в рамках декларации безопасности. На практике отсутствие декларации безопасности может приводить к отсутствию контроля за техническим состоянием ГТС. Представляется целесообразным дополнить федеральные нормативные документы указанием, что мониторинг ГТС IV класса должен осуществляться не реже двух раз в год, а минимальный объем мониторинга включает визуально-инструментальный контроль сооружений напорного фронта.

4. Внесение в Российский регистр ГТС, а следовательно, и государственный контроль за состоянием сооружений, производится после разработки и утверждения декларации безопасности ГТС, плана локализации и ликвидации опасных повреждений и аварий на ГТС, правил эксплуатации ГТС. У муниципальных и региональных властей, как и у других собственников, не всегда первоочередно выделяются средства на разработку необходимого пакета документов. Поэтому представляется целесообразным на федеральном уровне систематизировать информацию о ГТС, не внесенных в Российский регистр ГТС, в том числе и бесхозных, с целью осуществления контроля за их техническим состоянием, а также процессами окончательной передачи этих сооружений в собственность, декларирования безопасности и внесения в Российский регистр ГТС.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Кроличенко В.В.** Методика оценки риска последствий аварий на гидротехнических сооружениях напорного типа с применением аэрогеодезических технологий идентификации их устойчивости в экстремальных ситуациях: автореферат дис. ... канд. техн. наук. М.: МИИГАиК, 2010.
2. **Постановление** Правительства РФ № 1607 от 05.10.2020 «Об утверждении критериев классификации гидротехнических сооружений».
3. **СП 58.13330.2019.** Гидротехнические сооружения. Основные положения.
4. **Федеральный закон** № 117-ФЗ от 21.07.1997. О безопасности гидротехнических сооружений (с изменениями на 11 июня 2021 года).

5. **Постановление** Правительства РФ № 1892 от 20.11.2020 «О декларировании безопасности гидротехнических сооружений».
6. **Постановление** Правительства РФ № 1893 от 20.11.2020 «Об утверждении Правил формирования и ведения Российского регистра гидротехнических сооружений».
7. **Симутин А.Н., Дейнеко А.В., Зерцалов М.Г.** Опыт использования отечественной автоматизированной системы гидростатического нивелирования «Монитрон» при мониторинге гидротехнических сооружений // Гидротехническое строительство. 2021. № 5. С. 14–19.
8. **Официальный сайт** руководителя фракции Государственной Думы Федерального Собрания Российской Федерации «Справедливая Россия – за правду» Сергея Миронова // Материалы из сети интернет: mironov.ru
9. **Официальный интернет-портал** Национального информационного агентства Экология (Росприроднадзор. Федеральная служба по надзору в сфере природопользования) // Материалы из сети интернет: pia.eco
10. **Фролов Д.И., Щурский О.М., Пименов В.И.** Организация и проведение работ по выявлению и сокращению количества бесхозяйных гидротехнических сооружений и обеспечению их безопасности // Гидротехническое строительство. 2012. № 11. С. 18–21.
11. **Официальный сайт** Вести Калмыкия // Материалы из сети интернет: vesti-kalmykia.ru
12. **Официальный** интернет-портал администрации городского округа Сергиева Посада // Материалы из сети интернет: sergiev-posad.rf/вики/банний-пруд/
13. **Официальный** интернет-портал администрации городского округа Сергиева Посада // Материалы из сети интернет: sergiev-posad.rf/вики/келарский-пруд/
14. **Официальный** интернет-портал администрации городского округа Сергиева Посада // Материалы из сети интернет: sergiev-posad.rf/море-моресиняя-волна/
15. **Черных О. Н., Волков В. И., Сабитов М.А., Алтунин В.И.** О некоторых аспектах оценки размера вероятного вреда в результате аварии гидротехнических сооружений // Природообустройство. 2014. № 4. С. 46–52.
16. **СТП ВНИИГ 210.02.НТ-04.** Методические указания по проведению анализа риска аварий гидротехнических сооружений. СПб.: Изд-во АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2005, 100 с.
17. **ГОСТ Р 22.2.09-2015.** Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Экспертная оценка уровня безопасности и риска аварий гидротехнических сооружений. Общие положения. М.: Стандартинформ, 2016.
18. **Официальный** интернет-портал администрации городского округа Люберцы // Материалы из сети интернет: люберцы.rf/рубрики/parki/malahovskoe-ozero/razvitie-territorii

REFERENCES

1. Krolichenko V.V. Methodology for assessing the risk of consequences of accidents at hydraulic structures of pressure type using aerogeodetic technologies for identifying their stability in extreme situations: abstract of the thesis of a Candidate of Technical Sciences. Moscow: МИГАiK, 2010. (In Russ.).
2. Decree of the Government of the Russian Federation № 1607 of 05.10.2020 «On approval of criteria for classification of hydraulic structures». (In Russ.).
3. SP 58.13330.2019. Hydraulic structures. Basic statements. (In Russ.).
4. Federal Law № 117-FZ of 21.07.1997. On the safety of hydro-technical structures (as amended on June 11, 2021). (In Russ.).
5. Decree of the Government of the Russian Federation № 1892 of 20.11.2020 «On the declaration of the safety of hydraulic structures». (In Russ.).

6. Decree of the Government of the Russian Federation № 1893 of 20.11.2020 «On the approval of the Rules for the formation and maintenance of the Russian Register of hydraulic structures». (In Russ.).

7. Simutin A.N., Deineko A.V., Zertsalov M.G. Experience of using the home-made «Monitron» automated hydrostatic-leveling system for monitoring of hydraulic structures // *Gidrotekhnicheskoye stroitel'stvo – Power Technology and Engineering*. 2021;5:14-19. (In Russ.).

8. Official website of the head of the faction of the State Duma of the Federal Assembly of the Russian Federation «A Just Russia – For Truth» Sergey Mironov // Materials from the Internet: mironov.ru

9. The official Internet portal of the National Information Agency Ecology (Rosprirodnadzor. Federal Service for Supervision of Environmental Management) // Materials from the Internet: nia.eco

10. Frolov D.I., Shchursky O.M., Pimenov V.I. Organization and carrying out of work to identify and reduce the number of ownerless hydraulic structures and ensure their safety // *Gidrotekhnicheskoye stroitel'stvo – Power Technology and Engineering*. 2012;11:18-21. (In Russ.).

11. Official website of Vesti Kalmykia // Materials from the Internet: vestikalmykia.ru

12. The official Internet portal of the administration of the Sergiev Posad city district // Materials from the Internet: <https://сергиев-посад.рф/вики/банный-пруд/>

13. The official Internet portal of the administration of the Sergiev Posad city district // Materials from the Internet: <https://сергиев-посад.рф/вики/келарский-пруд/>

14. The official Internet portal of the administration of the Sergiev Posad city district // Materials from the Internet: <https://сергиев-посад.рф/море-море-синяя-волна/>

15. Chernykh O. N., Volkov V. I., Sabitov M.A., Altunin V.I. On some aspects of assessing the amount of probable damage as a result of an accident of hydraulic structures // *Nature management*. 2014. № 4. pp. 46-52. (In Russ.).

16. STP VNIIG 210.02.NT-04. Methodological guidelines for conducting an analysis of the risk of accidents of hydraulic structures. Saint Petersburg: Publishing House of JSC «Vedeneev VNIIG»; 2005. 100 p. (In Russ.).

17. GOST R 22.2.09-2015. Safety in emergencies. Expert assessment of safety and accident risk levels for hydraulic structure. General principles. Moscow: Standartinform; 2016. (In Russ.).

18. The official Internet portal of the Lyubertsy city district administration // Materials from the Internet: <https://люберцы.рф/рубрики/parki/malahovskoe-ozero/razvitie-territorii>

Информация об авторах

Л.С. Дейнеко – канд. техн. наук, доцент, главный инженер;

А.В. Дейнеко – канд. техн. наук, главный инженер;

Е.А. Антясова – аспирант, инженер 2 категории.

Information about the authors

L.S. Deineko – Cand. Sci. (Techn.), Associate Professor, Head of the technical department;

A.V. Deineko – Cand. Sci. (Techn.), Chief Engineer;

E.A. Antyasova – PhD Student, Category 2 Engineer.

Статья поступила в редакцию 25.09.2023; одобрена после рецензирования 08.10.2023; принята к публикации 20.12.2023.

The article was submitted 25.09.2023; approved after reviewing 08.10.2023; accepted for publication 20.12.2023.

Научная статья
УДК 626/627.03.042.019.3

СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ОПАСНЫХ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЯХ

Станислав Викторович Сольский¹, Юлия Евгеньевна Назукина²

^{1,2} АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», Санкт-Петербург, Россия,

¹ solsky@yandex.ru

² nazukinaue@vniig.ru

Аннотация. Приведены результаты систематизации опасных геологических и инженерно-геологических процессов и явлений, по результатам которой авторами сделан вывод о том, что наибольший интерес и сложность вызывают изучение, прогнозирование и мониторинг криогенных процессов и явлений. На основании анализа положений и требований нормативных документов выявлена необходимость усовершенствования методики геокриологического мониторинга и прогноза состояния инженерно-геологической среды для каждого из этапов жизненного цикла гидротехнических сооружений, а также необходимость доработки рекомендаций по управляющим воздействиям для обеспечения стабильности плотин мерзлого и талого типов.

Ключевые слова: инженерно-геологические процессы, литотехническая система «ГТС–основание», грунты, грунтовые сооружения, мониторинг, прогноз опасных процессов, управляющие воздействия

Для цитирования: Сольский С.В., Назукина Ю.Е. Систематизация опасных инженерно-геологических процессов на гидротехнических сооружениях // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2023. Т. 310. С. 47–61.

Original article

SYSTEMATIZATION OF HAZARDOUS ENGINEERING-GEOLOGICAL PROCESSES AT HYDRAULIC STRUCTURES

Stanislav V. Solsky¹, Yuliya E. Nazukina²

^{1,2} JSC «Vedeneev VNIIG», Saint Petersburg, Russia,

¹ solsky@yandex.ru

² nazukinaue@vniig.ru

Abstract. The article presents the results of systematization of hazardous geological and engineering-geological processes and phenomenon. According to the results of the work the authors concluded that the study, prediction and monitoring of cryogenic processes and phenomenon attract the most interest and complexity. Based on the analysis of the provisions and requirements of regulatory documents, the need to improve the methodology of geocryological monitoring and prediction of the state of the engineering and geological environment for each of the stages of the life cycle of hydraulic structures have been identified. Additionally it is also necessary to finalize recommendations on control actions to ensure the stability of frozen and thawed dams.

Keywords: engineering and geological processes, lithotechnical system "hydraulic structure-base", grounds, ground structures, monitoring, prediction of hazardous processes, control effects

For citation: Solsky S.V.¹, Nazukina Yu.E. Systematization of hazardous engineering-geological processes at hydraulic structures. *Proceedings of the VNIIG*. 2023;310:47-61. (In Russ.).

Строительство гидротехнических сооружений (ГТС) тесно связано с инженерно-геологическими условиями их размещения и вызывает значительные преобразования существующей инженерно-геологической среды, зачастую вызывая новые опасные физико-геологические процессы и явления или интенсифицируя уже существующие. Безопасная и надежная эксплуатация ГТС различного назначения во многом зависит от достоверности комплексной оценки состояния системы *сооружение–основание*.

Факторы, вызывающие изменение геологической среды при строительстве и в процессе эксплуатации ГТС различного назначения, многочисленны и находятся в тесном взаимодействии с процессами, которые они вызывают (рисунок).



Причины возникновения опасных инженерно-геологических процессов

Для обеспечения раннего предупреждения развития негативных инженерно-геологических процессов и явлений в обязательном порядке должен выполняться прогноз, и была организована система мониторинга для каждой из стадий жизненного цикла сооружения. Прогноз изменения литотехнической системы *ГТС–основание* должен базироваться на всестороннем изучении процессов, их причин, условий проявления и механизмов. В рамках настоящего исследования экзогенные процессы были систематизированы на основе анализа литературных и нормативных источников [1–19], а также собственного опыта.

Авторами рассмотрены основные группы экзогенных инженерно-геологических и геологических процессов, встречающихся на территориях размещения гидротехнических сооружений.

В качестве систематизационных признаков были выбраны условия и причины возникновения процессов, влияние их на характеристики грунтов, последствия развития того или иного процесса, методы контроля, прогноза и последствия, а также управляющие воздействия по безопасной эксплуатации для каждого из рассматриваемых процессов.

Основные условия и причины возникновения экзогенных инженерно-геологических процессов

Выветривание (гипергенез):

региональные факторы (рельеф, гипсометрическое положение пород, трещиноватость, тектоническая нарушенность, состав и структурно-текстурные особенности горных пород);

зональные факторы (атмосферные осадки, тепловая активность, газы, биологическая продуктивность);

техногенные факторы (гидрохимическая обстановка, неорганические кислоты и пр.) [1].

Гравитационные процессы (оползни, обвалы, осыпи):

крутизна склона, расчлененность рельефа;

мощность отложений;

сейсмичность района;

состав и свойства грунтов;

гидрогеологические условия;

наличие/отсутствие растительности;

антропогенное воздействие (подрезка склонов, выпас скота и пр.)

Гидрогенные процессы:

Переработка берегов водохранилищ:

гидрогеогенные факторы (величина подпора и положение уровня грунтовых вод, водопроявления на склонах, химический состав подземных вод);

гидрогенные факторы (волновой и уровенный режимы, течения, поток наносов, сгонно-нагонные явления);

климатические условия (температурный, ветровой, ледовый режимы, атмосферные осадки);

прочие (растительность, судовое волнение, хозяйственная деятельность человека);

геологические условия (состав, состояние, условия залегания пород, неотектоника);

геоморфологические условия (рельеф, конфигурация береговой линии) [1,2].

Абразия:

волно-прибойная деятельность воды;

приливно-отливные процессы;

морфологические особенности морских берегов;

литологический состав, состояние и свойства пород, слагающих береговой уступ, условия их залегания;

неотектонические особенности;

хозяйственная деятельность человека в прибрежной зоне [2].

Эрозия:

строение и крутизна склонов;

геологическое строение – свойства отложений, их состав, засоленность, сопротивляемость размыву;

наличие и характер растительного слоя;

климатический характер – интенсивность, количество и повторяемость осадков;

хозяйственная деятельность человека;

неотектонические особенности территорий;

размывающая деятельность вод постоянных и временных водотоков.

Сели:

климатические условия;

рельеф местности;

гидрографическая сеть (постоянные и временные водотоки);

геологические факторы – состав пород, наличие, скопление рыхлого обломочного материала;

деятельность человека [1], включая наличие искусственных водоемов и накопителей с потенциальной возможностью образования волны прорыва.

Гидрогенно-гидрогеогенные (карст, суффозия):

литологическое строение, структурно-текстурные особенности пород;

положение карстующихся пород в инженерно-геологическом разрезе;

трещиноватость пород, наличие пустот;

тектонические структуры;

климатические и гидрологические условия;

гидродинамические и гидрогеохимические условия;

техногенные факторы [1,5].

Эоловые процессы:

рельеф;

наличие пылеватых и песчаных грунтов, его влажность;

прочность сцепления грунта;

отсутствие растительности;

климат;

деятельность направленных воздушных потоков [1].

Криогенные процессы и явления:

Криогенное пучение:

промерзание грунта;

дисперсность грунтов (преимущественно пылеватые);

минеральный состав;

плотность и влажность;

состав обменных катионов [6].

Наледи:

естественная гравитационная разгрузка бассейнов подземных вод;

промерзание водоносных систем с образованием криогенного напора;

приложение внешней нагрузки на ледяной покров;

колебание расходов подналедных водных потоков;

таяние снега и льда в условиях частого перехода температур воздуха через 0 °С;

водоприток на охлажденные берега в результате периодических и непериодических приливов;

сброс промышленных и бытовых вод в холодное время года;

процесс широко проявлен в районах распространения аллювиальных, пролювиальных, флювиогляциальных отложений [1, 6].

Термокарст:

изменение теплообмена на поверхности почвы, в частности, в результате хозяйственной деятельности человека;

наличие сильнольдистых многолетнемерзлых пород [1].

Морозобойное растрескивание:

Развито повсеместно в районах с глубоким сезонным промерзанием пород, особенно в условиях континентального климата.

Солифлюкция:

действие гравитационных сил (основная причина);

смещающиеся отложения представлены тонкодисперсными пылеватыми грунтами;

влажность грунтов должна достигать полной влагоемкости;

наличие уклонов, обеспечивающих медленное течение грунтов (3–10°).

Курумы:

температурная, гидрогенная и криогенная (поднятие обломков в направлении, перпендикулярном к склону) десерпции; дезинтеграция обломочного материала, гидродинамическое воздействие;

наличие многолетнемерзлых пород или глубокого сезонного промерзания;

суровый климат, благоприятствующий преобразованию рыхлых обломочных отложений;

наличие склонов с крутизной от 3–5° до угла естественного откоса грубообломочного материала и экспозиции;

близкое к дневной поверхности залегание скальных трещиноватых пород, устойчивых к выветриванию;

существенные колебания температур на поверхности грунта;

большое количество атмосферных осадков или геоморфологические предпосылки для концентрации поверхностного и подповерхностного стоков [6].

Термоабразия:

тепловой и урвненный режимы у подножья берегового уступа;

льдистость пород, наличие подземных льдов;

механическая энергия волн.

Термоэрозия:

наличие постоянных или временных водотоков;

температура потока;

сезонное протаивание льдистых пород;

антропогенное воздействие;

рельеф;

криогенная текстура грунта, льдистость, температура, прочностные и теплофизические свойства [1].

Негативное влияние на характеристики грунтов проявляется, как правило, в нарушении и разрушении структуры пород, изменении физико-механических и фильтрационных свойств, состава, а также изменении строения всей грунтовой толщи, образовании пустот, разрушении – сносе и

переотложении естественных массивов горных пород и откосов искусственных сооружений и т.д. Эти изменения приводят к снижению устойчивости и фильтрационной прочности грунтов тела и основания сооружений, изменению очертаний откосов и склонов, оседанию земной поверхности, изменению режима подземных вод и т.д.

Все вышеуказанные нарушения приводят к последствиям разной степени тяжести: от изменения микрорельефа местности и осложнения хозяйственной деятельности до полного разрушения инженерных сооружений.

Для минимизации и предотвращения воздействия опасных инженерно-геологических процессов на ГТС были сгруппированы методы контроля, методы прогноза и управляющие воздействия (таблица).

**Мероприятия по уменьшению воздействия
опасных инженерно-геологических процессов на ГТС**

Процессы	Методы контроля за проявлением процесса	Методы прогноза	Управляющие воздействия по безопасной эксплуатации
Выветривание (гипергенез)	Натурные наблюдения за скоростью выветривания на обнажениях и искусственно созданных откосах и опытных площадках, геофизические исследования. Составление карт мощности коры выветривания и оценка ее пространственной изменчивости	Количественный и пространственно-временной прогноз процесса выветривания в период строительства и эксплуатации сооружения (устойчивость системы сооружение-основание). Натурное и лабораторное (вещественное) моделирование	Планировка территории, отвод вод. Покрытие горных пород непроницаемыми для агентов выветривания материалами, оставление защитных целиков, пропитывание пород различными веществами, цементирование, искусственная нейтрализация агентов выветривания [1]
Оползни, обвалы, осыпи	Геодезические наблюдения, режимные наблюдения за изменением напряженного состояния геофизическими методами, изменением нормальных напряжений и положением уровня подземных вод, порового давления и методами частичной разгрузки, изотопные методы	Методы регионального прогнозирования: качественного (историко-геологическое, оценка устойчивости территории в баллах) и количественного (детерминированное – оценка интенсивности проявления процесса и вероятностное – геодинамического потенциала); локального прогнозирования – количественное (детерминированное: расчет устойчивости склонов, натурные аналоги, физического	Активные меры: дренирование подземных вод (различные виды дренажа), регулирование поверхностного стока (нагорные каналы, каналы), защита оползневых берегов водоемов. Пассивные мероприятия: уположивание оползневых откосов, сооружение подпорных стенок (шпунты, габионы и пр.), анкерного крепления, контрфорсных столбов, устройство шпонок и свай, удерживающих сеток, лесомелиорация.

Процессы	Методы контроля за проявлением процесса	Методы прогноза	Управляющие воздействия по безопасной эксплуатации
Оползни, обвалы, осыпи		моделирование; вероятностное: индикаторы (симптомы), вероятностно-статистические) [2]	Изменение физико-механических свойств грунтов методами мелиорации: механическое уплотнение, обжиг или клинкеризация, холодная и горячая битумизация и цементация, силикатизация, электротехническое закрепление, временное – электродренаж, искусственное замораживание. Устройство улавливающих сооружений, закрепление пород. Профилактические мероприятия (наблюдения, создание охранных зон, расчистка снега) [3,4]
Переработка берегов водохранилищ	Натурные гидрологические наблюдения, геологические исследования, рекогносцировочное обследование береговой линии, стационарные наблюдения за деформацией береговых склонов [5]	Существует более 20 методов прогноза на различные сроки: универсальные (энергетические, косвенных и прямых инженерно-геологических аналогий), специальные методы для водохранилищ, расположенных в горноскладчатых областях, в областях распространения лессовых, закарстованных пород, для оползневых склонов водохранилищ	Укрепление и искусственное улучшение свойств грунтового массива (аналогичные, применяемым при гравитационных процессах). Защитные мероприятия: удерживающие сооружения – подпорные, шпунтовые и свайные стены, волноломы, боны; поддерживающие конструкции и мероприятия – железобетонные плиты, асфальтовое покрытие, каменная наброска –, геосинтетические материалы, посадка растительности. Дренажное прилегающих территорий. Волногасящие вдольбереговые и откосные сооружения и пляжеудерживающие конструкции.

Продолжение таблицы

Процессы	Методы контроля за проявлением процесса	Методы прогноза	Управляющие воздействия по безопасной эксплуатации
			Струенаправляющие дамбы [3]. Изменение антропогенных нагрузок на береговых склонах – исключение движения и работы тяжелой техники, вибрационных воздействий и т.п.
Абразия	Натурные гидрологические наблюдения, геологические исследования, реконструктивное обследование береговой линии, стационарные наблюдения за деформацией береговых склонов, данные глобального мониторинга	Методы палеогеографического анализа, аналогий, краткосрочные и долгосрочные методы прогноза, математическое моделирование	Берегозащитные сооружения – пассивные: волноотбойные стенки, сооружения откосного типа, устройство берм – уступов, укрепленных ж/б монолитными или сборными плитами, индустриальными нежесткими ж/б тюфяками или каменной наброски, уполаживание и крепление откосов и пр.; активные – буны, подводные волноломы, сооружения прерывистого типа, габионы, подпитка пляжей и др.
Эрозия (склоновая, овражная, речная)	Геодезические и визуальные наблюдения, анализ космических и аэрофотоснимков, гидрологические и метеорологические наблюдения, геологические наблюдения, лабораторные исследования	Расчетные методы прогнозирования плоскостного смыва, предельных размеров оврагов, устойчивости русла	Профилактические мероприятия: соблюдение правил землепользования и агротехники, прекращение вырубки лесов и кустарников. Активные мероприятия: регулирование поверхностного стока, устройство водоотводящих сооружений, струенаправляющих стенок [3]. Пассивные мероприятия: заравнивание промоин, посев многолетних трав, кустарников и залесение прилегающих территорий, планировка местности, работы по укреплению русла оврагов:

Процессы	Методы контроля за проявлением процесса	Методы прогноза	Управляющие воздействия по безопасной эксплуатации
			<p>мощение дна, устройство лотков по дну, обвалование и устройство канав в устье оврагов; плетни с земляной забивкой.</p> <p>Обустройство берегоукрепительных сооружений – набережных, подпорных стенок, набросок, габионов и пр.</p>
Сели	Аэрофотосъемка, аэровизуальные наблюдения, система мониторинга, включающая метеорологические, гидрологические и геологические наблюдения	Прогнозирование методом инженерно-геологических аналогий, методы локального прогноза селеопасности	<p>Активные мероприятия: организационно-хозяйственные, лесомелиоративные, регулирование стока, спуск ледниковых и подпрудных озер.</p> <p>Пассивные: строительство сквозных и сплошных барражей, плотин, селерегулирующих сооружений – селеспусков, селеотводов, дамб, подпорных стенок, порогов, запруд, шпор, плотин с отверстиями, селеуловитель М.С.Гагошидзе, ловчие каналы [3].</p> <p>Обеспечение безопасности ГТС на подпорных сооружениях</p>
Карст, суффозия	Карстологическое обследование (картирование проявлений карста на земной поверхности, определение их возраста, гидрогеологические исследования). Лабораторные работы и экспериментальные исследования. Режимные наблюдения за подземными водами и их	Количественный пространственно-временной прогноз карстового процесса в период строительства и эксплуатации сооружения вследствие изменения природных условий может выполняться различными методами: аналитическим, вероятностно-статистическим, методами физико-химического и	Организация стока поверхностных вод. Дренаж агрессивных подземных вод. Тампонирующее карстовых полостей и трещин. Создание в кровле карстующихся пород искусственного слоя. Особые виды фундаментов и конструктивные особенности сооружений. Безопасное размещение объектов на осваиваемой территории. Динамические воз-

Продолжение таблицы

Процессы	Методы контроля за проявлением процесса	Методы прогноза	Управляющие воздействия по безопасной эксплуатации
Карст, суффозия	составом, развитием карстового процесса и его проявлениями на поверхности. Контроль за состоянием грунтовой толщи в зоне ее взаимодействия с объектом. Контроль за напряженным состоянием и деформациями конструктивных элементов сооружений	вещественного моделирования, а также моделирования на эквивалентных материалах. Количественный прогноз развития суффозионного процесса методами прямых и косвенных инженерно-геологических аналогий, математического и физического моделирования	действия на грунты. Удаление суффозионно-неустойчивых грунтов. Снижение скорости движения подземных вод и их растворяющей способности. Устройство противодиффузионных и гидравлических завес. Поддержание концентрации солей не ниже предела насыщения
Эоловые денудация и аккумуляция	Инженерно-геологическая съемка, включающая лабораторное и полевое изучение свойств грунтов	Расчеты скорости и интенсивности процесса	Фитомелиорация, создание систем механической защиты, лесозащитных полос, безаккумуляционное перераспределение подвижного материала, периодические расчистки нанесенного материала
Криогенное пучение	Прямые полевые наблюдения и мониторинг динамики бугров пучения по материалам дешифрирования аэро- и космоснимков [1]	Количественные методы прогноза, лабораторные исследования	Тепломелиоративные и гидромелиоративные, конструктивные, физико-химические и комбинированные мероприятия [1]
Наледи	Режимные наблюдения: метеорологические, гидрологические, гидрогеологические	Расчет и прогноз проведут по данным режимных наблюдений на типичных наледях района строительства [7]	Пассивные: устройство заграждений, сооружение резервных бассейнов и выемок для заполнения их льдом или наледной водой, усовершенствование конструкций сооружений и пр. Активные: промораживание водоносных горизонтов, тепловая мелиорация наледоопасного участка, механическая расчистка участка наледообразования

Продолжение таблицы

Процессы	Методы контроля за проявлением процесса	Методы прогноза	Управляющие воздействия по безопасной эксплуатации
Термокарст	Геодезические, термические натурные наблюдения	Прогноз потенциальной опасности термокарста при строительном освоении территории, составление прогнозных карт опасности проявления термокарста [1, 7]	Мероприятия активной и пассивной термостабилизации грунтов (сохранение растительного покрова, предохранение грунтов и льдов от протаивания, предпроектное оттаивание, искусственное замораживание, дренаж территорий и др.)
Морозобойное растрескивание	Визуальные наблюдения, геофизические исследования	Лабораторные исследования температурных деформаций, расчетные методы прогноза	Применение тепло- и гидроизоляций, устройство георешеток, защитные прослойки, замена грунта. Устройство искусственных демпфирующих слоев, искусственное изменение температурного режима на поверхности грунтов.
Солифлюкция	Визуальные наблюдения на склонах, откосах котлованов, выемок и насыпей, лабораторные исследования грунтов, режимные наблюдения за температурным и влажностным режимами и смещениями грунтов	Лабораторные исследования, полевые испытания, расчетные методы	Дренаж, защитные инженерные мероприятия, посадка растительности
Курумы	Наблюдения за скоростью смещений, составом пород, геофизические методы, наблюдения за температурным и влажностным режимами	Методы регионального и локального прогнозирования качественных и количественных	Перетрассировка, устройство улавливающих траншей и берм, улавливающих полей [1]

Продолжение таблицы

Процессы	Методы контроля за проявлением процесса	Методы прогноза	Управляющие воздействия по безопасной эксплуатации
Термоабразия	Аэрофотосъемка, режимные наблюдения за скоростью разрушения береговой линии, температурным полем, снежным покровом, льдообразованием, лабораторные исследования	Методы аналогий, математического моделирования [7]	Профилактические меры: фитомелиорация, создание искусственных отмелей. Активные мероприятия: строительство защитных береговых сооружений – волноломы, буны и пр. Регулирование термического режима водного бассейна и уменьшение температурного градиента воды и горных пород [8]
Термоэрозия	Визуальные обследования, режимные наблюдения: метеорологические, за глубиной сезонного оттаивания-промерзания, высотой снежного покрова, скоростью процесса термоэрозии, лабораторные исследования	Методы физико-математического моделирования	Восстановление почвенно-растительного слоя с помощью биоматов, упрочнение поверхности грунтов синтетическими материалами (геоматы, геосинтетика, георешетки), изменение характера поверхностного стока. Теплоизоляция труб [8]

В целом, экзогенные инженерно-геологические (выветривание, гравитационные, гидрогенные, гидрогенно-гидрогеогенные и золотые) процессы достаточно хорошо изучены, существует большое количество эффективных мероприятий по управлению ими, методов наблюдений и прогноза развития того или иного процесса. Проектирование, строительство и эксплуатация гидротехнических сооружений в суровых климатических условиях вызывают наибольшие проблемы и сложности. Несмотря на все успехи и достижения в области изучения криогенных процессов и явлений, следует отметить, что они до настоящего времени относятся к наиболее слабоизученным из всех групп экзогенных инженерно-геологических процессов, а также, что для многих из вышеназванных процессов отсутствуют действенные методы борьбы, а потому исследование криогенных процессов, в частности, на гидротехнических сооружениях, требует комплексного подхода. Опыт строительства и эксплуатации ГТС в районах распространения многолетнемерзлых пород (ММП) показывает, что большинство аварий обусловлены неконтролируемым развитием криогенных и фильтрационных процессов, связанных с переходом грунтовых сооружений и их оснований из одного теплового состояния в другое.

Заключение

1. По результатам систематизации авторами сделан вывод о том, что наибольший интерес и сложность вызывают изучение, прогнозирование и мониторинг криогенных процессов и явлений, отличающихся сложными механизмами развития за счет переходов пород из мерзлого состояния в талое и наоборот, вызывающих изменения физико-механических, химических, теплофизических и фильтрационных характеристик грунтов оснований и тел грунтовых ГТС.

2. На основании анализа положений и требований нормативных документов выявлена необходимость усовершенствования методики геокриологического мониторинга и прогноза состояния инженерно-геологической среды для каждого из этапов жизненного цикла ГТС, а также требуется доработка рекомендаций по управляющим воздействиям для обеспечения стабильности плотин мерзлого и талого типов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Бондарик Г.К., Пендин В.В., Ярг Л.А.** Инженерная геодинамика: учебник. 4-е изд. доп. М.: КДУ, 2015. 472 с.
2. **Иванов И.П., Тржцинский Ю.Б.** Инженерная геодинамика. СПб.: Наука, 2001. 416 с.
3. **Сольский С.В., Ладенко С.Ю., Моргунов К.П.** Инженерная мелиорация: учебное пособие. 2-е изд. СПб: Изд-во «Лань», 2018. 248 с.
4. **Сольский С.В.** Вторичное освоение техногенно-нагруженных территорий. Проблемы и решения. Санкт-Петербург: Изд-во ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2011. 323 с.
5. **Карпышев Е.С., Молоков Л.А., Нейштадт Л.И.** Инженерно-геологические изыскания для строительства гидротехнических сооружений: 2-е изд. М.: Энергия, 1980. 344 с.
6. **Ершов Э.Д.** Общая геокриология: Учебник. М.: изд-во МГУ, 2002. 682 с.
7. **Чернядьев В.П., Чеховский А.Л., Стремяков А.Я., Пакулин В.А.** Прогноз теплового состояния грунтов при освоении северных районов. М.: Наука, 1984. 136 с.
8. **Королев В.А.** Инженерная защита территорий и сооружения: Учебное пособие. М.: ИД КДУ, 2013. 470 с.
9. **СП 23.13330.2018.** Основания гидротехнических сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02-85. М.: Стандартинформ. 2019.
10. **СП 25.13330.2020.** Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. М., 2020.
11. **СП 58.13330.2012.** Гидротехнические сооружения. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 33-01-2003. М.: 2012.
12. **СП 39.13330.2012.** Плотины из грунтовых материалов. Актуализированная редакция СНиП 2.06.05-84. М.: 2012.
13. **СП 47.13330.2016.** Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96. М.: Стандартинформ. 2017.
14. **СП 446.1325800.2019.** Инженерно-геологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ. М.: Стандартинформ. 2019.
15. **СП 493.1325800.2020.** Инженерные изыскания для строительства в районах распространения многолетнемерзлых грунтов. Общие требования. М., 2020.
16. **СП 11-105-97. Часть II.** Правила производства работ в районах развития опасных геологических и инженерно-геологических процессов. Госстрой России. М., 2003.

17. **СП 479.1325800.2019.** Инженерные изыскания для строительства в районах развития селевых процессов. Общие требования. М.: Стандартинформ. 2020.
18. **СП 104.13330.2016.** Инженерная защита территории от затопления и подтопления. Актуализированная редакция СНиП 2.06.15-85. М.: Стандартинформ. 2017.
19. **СП 116.13330.2012.** Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Актуализированная редакция СНиП 22-02-2003. М., 2012.

REFERENCES

1. Bondarik GK, Pendin VV, Yarg L.A. Engineering Geodynamics: A Graduate Student. 4th ed. additional M.: KDU, 2015. 472 p. (In Russ.).
2. Ivanov I.P., Trzhtsinsky Yu.B. Engineering geodynamics. St. Petersburg: Science, 2001. 416 p. (In Russ.).
3. Solsky S.V., Ladenko S.Yu., Morgunov K.P. Engineering reclamation: a textbook. 2nd ed. St. Petersburg: Publishing House «Lan,» 2018. 248 p. (In Russ.).
4. Solsky S.V. Secondary development of technogenic-loaded territories. Problems and solutions. St. Petersburg: Publishing House of OJSC «VNIIG named after B.E. Vedeneeva». 2011. 323 p. (In Russ.).
5. Karpyshev ES, Molokov LA, Neustadt L.I. Engineering and geological surveys for the construction of hydraulic structures: 2nd ed. M.: Energy, 1980. 344 p. (In Russ.).
6. Ershov E.D. General Geocryology: Textbook. M.: Publishing House of Moscow State University, 2002. 682 p. (In Russ.).
7. Chernyadyev V.P., Chekhovsky A.L., Stremyakov A.Ya., Pakulin V.A. The forecast of the thermal state of soils during the development of the northern regions. M.: Science, 1984. 136 p. (In Russ.).
8. Korolev V.A. Engineering protection of territories and structures: Textbook. M.: ID KDU, 2013. 470 p. (In Russ.).
9. SP 23.13330.2018. Foundations of hydraulic structures. Active edition of SNiP 2.02-85. M.: Standardinform. 2019. (In Russ.).
10. SP 25.13330.2020. Bases and foundations on permafrost soils. M., 2020. (In Russ.).
11. SP 58.13330.2012. Hydraulic structures. Basic principles. Actual version of SNiP 33-01-2003. M.: 2012. (In Russ.).
12. SP 39.13330.2012. Dams made of ground materials. Revised SNiP 2.06.05-84. M.: 2012. (In Russ.).
13. SP 47.13330.2016. Engineering surveys for construction. Main provisions. Actual version of SNiP 11-02-96. M.: Standardinform. 2017. (In Russ.).
14. SP 446.1325800.2019. Geotechnical survey for construction. General Rules of Work Execution. M.: Standardinform. 2019. (In Russ.).
15. SP 493.1325800.2020. Engineering surveys for construction of permafrost soils in permafrost zones. General requirements. M., 2020. (In Russ.).
16. SP 11-105-97. Part II. Rules for Performance of Works in Areas of Development of Hazardous Geological and Geotechnical Processes. Gosstroy of Russia. M., 2003. (In Russ.).
17. SP 479.1325800.2019. Engineering surveys for construction in permafrost zones of development of mudflow processes. General requirements. M.: Standardinform. 2020. (In Russ.).
18. SP 104.13330.2016. Engineering protection of the territory from flooding and flooding. Actual revision of SNiP 2.06.15-85. M.: Standardinform. 2017. (In Russ.).
19. SP 116.13330.2012. Engineering protection of territories, buildings and facilities against hazardous geological processes. Actual version of SNiP 22-02-2003. M., 2012. (In Russ.).

Информация об авторах

С.В. Сольский – доктор техн. наук, главный научный сотрудник;
Ю.Е. Назукина – младший научный сотрудник.

Information about the authors

S.V. Solsky – Dr. Sci. (Techn.), Chief Researcher;
Y.E. Nazukina – Junior Researcher.

Статья поступила в редакцию 25.09.2023; одобрена после рецензирования 22.11.2023; принята к публикации 20.12.2023.

The article was submitted 25.09.2023; approved after reviewing 22.11.2023; accepted for publication 20.12.2023.

Научная статья
УДК 628.1:621.311

ПРЕИМУЩЕСТВА ВОДОПОДГОТОВКИ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИМПУЛЬСА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ БИООБРАСТАНИЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ТЭС, АЭС И ГЭС

Михаил Николаевич Уразаев¹, Инга Маратовна Царовцева²,
Леонид Эдуардович Беллендир³

¹ Группа Компаний «АРКОН ТЕХНОЛОГИЯ», Москва, Россия,

^{2,3} АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», Санкт-Петербург, Россия,

¹ mu@ arcon-technology.ru

² TSarovtsevaIM@vniig.ru

³ BellendirLE@vniig.ru

Аннотация. Рассмотрены различные технологические возможности водоподготовки для предотвращения биообращения в трубопроводах гидротехнических систем ТЭС, АЭС и ГЭС. Проведён сравнительный анализ использования методов биологического обеззараживания воды, основанных на использовании реагентов, ультрафиолетового, ультразвукового излучения и электромагнитного импульса.

Ключевые слова: биообращание, биологические системы, метод электромагнитного импульса, трубопровод, гидротехнические системы

Для цитирования: Уразаев М.Н., Царовцева И.М., Беллендир Л.Э. Преимущества водоподготовки методом электромагнитного импульса для решения задач противодействия биообращения технологического оборудования ТЭС, АЭС И ГЭС // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2023. Т. 310. С. 62–71.

Original article

ADVANTAGES OF WATER TREATMENT BY THE ELECTROMAGNETIC PULSE METHOD FOR SOLVING THE PROBLEMS OF COUNTERACTING BIOFOULING OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT OF THERMAL POWER PLANTS, NUCLEAR POWER PLANTS AND HYDROELECTRIC POWER PLANTS

Michael N. Urazaev¹, Inga M. Tsarovtseva², Leonid E. Bellendir³

¹ Group of Companies «ARKON TECHNOLOGY», Moscow, Russia,

^{2,3} JSC «Vedeneev VNIIG», Saint Petersburg, Russia

¹ mu@ arcon-technology.ru

² TSarovtsevaIM@vniig.ru

³ BellendirLE@vniig.ru

Abstract. The article discusses various technological possibilities for water treatment to prevent biofouling in pipelines of hydraulic systems of thermal power plants, nuclear power plants and hydroelectric power plants. A comparative analysis of the use of biological water disinfection methods based on the use of reagents, ultraviolet, ultrasonic radiation and electromagnetic pulses was carried out.

© Уразаев М.Н., Царовцева И.М., Беллендир Л.Э., 2023

Keywords: *biofouling, biological systems, electromagnetic pulse method, pipeline, hydraulic systems*

For citation: Urazaev M.N., Tsarovtseva I.M., Bellendir L.E. Advantages of water treatment by the electromagnetic pulse method for solving the problems of counteracting biofouling of technological equipment of thermal power plants, nuclear power plants and hydroelectric power plants. *Proceedings of the VNIIG*. 2023;310:62-71. (In Russ.).

Борьба с биообрастанием технологического оборудования на ТЭС, АЭС и ГЭС требует значительных средств для снижения влияния этого явления на работу систем в целом и, в частности, на работу трубопроводной системы. Процесс зарастания трубопроводов происходит быстро, особенно в условиях с повышенной температурой. Целесообразно рассмотреть биообрастание в двух принципиально разных типах систем – закрытых и открытых.

В закрытых типах систем, таких как системы оборотного водоснабжения или системы теплообмена замкнутого типа, образуются биоплёнки, которые представляют собой замкнутую устойчивую биологическую конгломерацию, состоящую из различных микроорганизмов (бактерий, грибов, микроводорослей) и неорганических включений. Биопленка снижает теплопередачу, уменьшает эффективность работы оборудования, препятствует действию применяемых ингибиторов коррозии и солеотложения, способствует питтинговой коррозии материалов. Сама же биопленка является экраном, защищающим сформированную микробиоту, приводящую к биообрастанию, от колебаний рН, воздействия биоцидов и т.д.

Для борьбы с биоплёнками наряду с механическими методами преимущественно применяются химические методы обработки. Для снижения биообрастания в замкнутых системах водоснабжения применяется хлорирование различного типа, обработка медным купоросом, введение ртути-содержащих веществ, углекислого газа, химических реактивов, вызывающих активное газовыделение, в том числе в присутствии различных диспергаторов, поверхностно активных веществ (ПАВ) и т. д. Необходимо отметить, что рассматриваемые замкнутые системы являются замкнутыми лишь условно, поскольку требуют периодической подпитки водой за счет постоянного естественного выноса воды из них, происходящего в том или ином виде.

Исходя из того, что де-факто такие системы не являются полностью изолированными от внешней среды, влияние на внешнюю окружающую среду весьма активных, вредных и часто токсичных химических соединений, вводимых во внешнюю среду ТЭС, АЭС и ГЭС и выносимых из них в качестве продуктов химических реакций, часто игнорируются.

Кроме того, необходимо учитывать, что применение химических методов борьбы с биоплёнками часто приводит к ускорению коррозии материалов гидросистем, что, в конечном счете, приводит к увеличению объема регламентных и ремонтных работ и увеличению операционных затрат.

Задача борьбы с биообрастанием в открытых системах, помимо рассмотренной ранее проблемы образования биопленок, требует решения задачи препятствованию биозарастанию сечений трубопроводной системы.

Необходимо отметить, что в открытых гидротехнических системах часто встречается биообрастание дрейссенового типа (моллюск *Dreissena*

polymorpha). Бактериальные биоплёнки, образующиеся на поверхностях конструкций, способствуют закреплению *Dreissena polymorpha* на поверхностях.

Биообрастание в открытых системах в зависимости от внешних факторов и технических параметров систем энергетических объектов могут происходить достаточно быстро и существенно влиять на скорость зарастания сечений трубопроводов и сужений. Последнее приводит к значительному повышению операционных затрат при эксплуатации энергетических объектов в целом.

Помимо механических методов очистки конструктивных элементов энергетических объектов от биообрастания, а также угнетения развития биопленок реагентным методом применяются и физические методы. Для обеззараживания воды используют ультрафиолет, ультразвук и электромагнитные излучения.

Одним из методов является нанесение специальных покрытий на поверхность трубопроводов, что не решает полностью проблемы биообрастания, поскольку такой подход не может обеспечить развитие микробной биоплёнки и дальнейшего закрепления моллюсков на шероховатостях поверхностей трубопроводов и узкостей. Обеспечение же идеально ровных поверхностей требует применения специальных методов снижения шероховатостей, особенно на сварных стыках и иных соединениях, что становится экономически неоправданным с точки зрения капитальных затрат.

Применение методов микро- и ультрафильтрации воды, в том числе систем обратного или прямого осмоса, для объектов энергетики не является возможным из-за своей низкой производительности, высоких капитальных затрат и высоких операционных расходов.

Выбор физических методов обеззараживания воды на энергетических объектах во многом зависит от условий эксплуатации и конкретных задач, которые требуют решения.

Использование ультразвукового излучения для угнетения развития биообрастания на ТЭС, АЭС и ГЭС может оказаться малоэффективным, так как происходит рассеивание энергии ультразвукового излучения в водной среде.

Метод, основанный на использовании ультрафиолетового излучения, применяется, в основном, при воздействии на воду ультрафиолетового излучения, имитируемого специальными источниками (преимущественно ртутными и полупроводниковыми). В наиболее распространённых ртутных лампах низкого давления, обеспечивающих достаточную мощность излучения, весь спектр излучения приходится на длину волны 253,7 нм, что хорошо согласуется с пиком кривой бактерицидной эффективности (то есть эффективности поглощения ультрафиолета молекулами ДНК), так как оказывает наибольшее влияние на ДНК. В том числе бактерицидное ультрафиолетовое излучение на этих длинах волн вызывает димеризацию тимина в молекулах ДНК. Накопление таких изменений в ДНК микроорганизмов приводит к замедлению темпов их размножения и элиминации. По сути, метод воздействия является накопительным и достаточно инерционным [1, 2].

При воздействии на простейшие виды (определённые группы грибов и водорослей) метод имеет не полную, но хорошую эффективность. При

воздействии на личинки и более сложные организмы требуется значительно более долгое воздействие при большей интенсивности излучения. Установлено, что для уничтожения большинства бактерий требуется доза излучения приблизительно 4 кВт/час на 1 см² поверхности.

При этом многие природные вещества, в том числе вода, задерживают проникновение УФ, а за счет присутствия в воде нано- и микроразмерных примесей, рассеивают энергию ультрафиолетового излучения. Поэтому на эффективность метода большое влияние оказывает мутность воды, что является существенной проблемой для класса задач, рассматриваемых в данной работе.

Оборудование с применением ультрафиолетового излучения традиционно применяется для водоподготовки преимущественно питьевой воды.

Показатели безремонтной эксплуатации оборудования сильно зависят от сроков работы излучающих элементов. Время стабильной эксплуатации лучших ультрафиолетовых ламп составляет около 6 месяцев, после этого ее бактериологическое воздействие падает. Для поддержания максимальных сроков эксплуатации требуется постоянная очистка поверхности лампы или ее барьерной поверхности, что существенно влияет на увеличение показателя операционных затрат. Обычно поставщики технологических комплексов, основанных на использовании ультрафиолетового излучения, не касаются этих показателей, обосновывая это тем, что показатели мутности воды являются зачастую трудно прогнозируемыми, поэтому регламентная замена ламп в процессе эксплуатации относится к ответственности эксплуатирующей организации. Одни из лучших показателей обеспечивают американские производители ртутных ламп, применяемых и израильскими поставщиками технологических комплексов.

Данный метод может обеспечивать эффективность бактериологического обеззараживания до 95 %. Поэтому использование его без дополнительных методов обеззараживания, например, для производства питьевой воды не допускается. В системах обеспечения питьевой водой приемы пролонгированного обеззараживания (озонирование, хлорирование) являются стандартными и обязательными. Данных по изменению коррозионной способности воды после применения метода ультрафиолетового излучения не имеется.

Экономические показатели метода считаются приемлемыми, но не самыми эффективными.

Поскольку для эмиссии ультрафиолетового излучения, который относится к видимому спектру излучений, требуется применение излучателей с большой селективностью преобразования электрической энергии в излучение выбранного диапазона, при этом наилучшие заявленные показатели не превышают 70 % для полупроводниковых или LED-приборов малой мощности. Для стандартных ртутных ламп повышенной мощности эти показатели не превышают 36–40 %.

К дополнительным затратам могут относиться энергетические затраты, требуемые для обеспечения насосного оборудования. Эксплуатационные затраты не могут быть низкими из-за необходимости проведения постоянных регламентных работ, связанных с очисткой поверхностей ламп от налипания и регулярной заменой ламп из-за потери ими излучающей

способности и, следовательно, мощности излучения. Капитальные вложения увеличиваются при проведении технических мероприятий, направленных на снижение мутности воды, что требует дополнительных затрат на фильтрацию и осветление.

Поскольку в процессе эксплуатации таких комплексов возникает задача сброса промывочных вод, требуется проведение дополнительных согласований по учету негативного воздействия сточных вод на окружающую среду.

Данный метод рассматривается в настоящей работе, поскольку были получены подтверждения его внедрения для гидросистем большой пропускной способности (производитель оборудования – Atlantium Technologies Lld (Израиль), место производства – США, поставка и монтаж ООО «КСТ-вортер») [3]. Производителем оборудования утверждается, что метод ультрафиолетового воздействия на живые организмы типа моллюска дрейссена (*Dreissena polymorpha*) является эффективным, хотя эти показатели и их зависимости от ряда внешних параметров в официальных материалах компании производителя пока не представлены.

Монтаж оборудования производится путем врезки в существующие трубопроводы. Врезка производится путем фланцевых соединений. Система управления и автоматизации имеет внешнюю компоновку с размещением в вынесенном блоке с компьютерным управлением.

Перспективным является метод комплексного ультрафиолетового и ультразвукового обеззараживания воды. Он базируется на одновременном воздействии на воду ультрафиолетового и ультразвукового излучения. В данном случае, помимо ультрафиолетового влияния, оказывается воздействие ультразвуковым излучением, которое повышает эффективность и снижает требования к мутности воды.

Производительность этого метода практически такая же, как и при обычном ультрафиолетовом методе. Подбор частоты ультразвукового воздействия является очень важным, поскольку при неправильном диапазоне ультразвукового воздействия может происходить активизация процессов размножения бактерий, грибов, вирусов, водорослей и простейших. При этом требования по мутности воды на 60 % мягче, чем при обычном ультрафиолетовом методе. Время межремонтной эксплуатации таких комплексов также, как и в ранее рассмотренном методе воздействия ультрафиолетом, определяется временем работы ультрафиолетовой лампы. Поэтому все требования для эксплуатации ламп, имитирующих излучение в ультрафиолетовом спектре, остаются неизменными, поскольку время выхода из строя систем ультразвукового излучения кратно больше, чем тот же показатель для ультрафиолетовой лампы*, поэтому при данном анализе он может не учитываться.

* Время работы ультразвуковых излучателей определяется, в первую очередь, работоспособностью конденсаторных сборок, которые применяются для формирования соответствующих импульсов, время работы на отказ которых с учетом эффекта деградации конденсаторов в процессе их работы под нагрузкой для лучших отечественных образцов равно 7000–10000 часам, а для лучших зарубежных образцов – до 500000 часов, но поскольку при правильном проектировании ультразвуковых излучателей блок управления импульсами этих устройств всегда является внешним, то при своевременном сервисном обслуживании, включающем,

Данный смешанный метод может также обеспечивать эффективность бактериологического обеззараживания до 95% и его использование для систем питьевого водоснабжения без дополнительных методов обеззараживания (озонирование, хлорирование) так же, как и для систем, использующих только ультрафиолетовое излучение, не допускается.

Экономические показатели при использовании одновременно ультрафиолетового и ультразвукового излучений практически равны по сравнению с методами, использующими исключительно ультрафиолетовое излучение. Капитальные вложения при этом приблизительно на 10% ниже, чем при использовании только ультрафиолетового излучения, за счет снижения требований к мутности воды и, как следствие, уменьшения затрат на фильтрацию. При этом конструкция облучающей ячейки является более сложной и, следовательно, сама ячейка является более дорогой.

Ещё одним интересным решением борьбы с биообрастанием является метод «Акваклер», который применяется компанией Hydropath Holdings Ltd (Великобритания). Этот метод основан на использовании электромагнитного поля, создаваемого генераторами электромагнитных импульсов малой мощности, которые в зоне создаваемого электромагнитного поля постепенно заряжают живые личинки организмов типа моллюска дрейссена отрицательными электрическими зарядами. При этом каждая отдельная личинка окружается несколькими молекулярными слоями поляризованной воды. Это приводит к созданию избыточного осмотического давления на границе оболочки личинки и поступления воды в ее цитоплазму, что тем самым нарушает метаболизм личинки и приводит к ее последующей деградации.

Такой подход, несомненно, является возможным, но является достаточно медленным и малоприменимым при высоких скоростях потока воды.

Кроме того, отсутствуют точные данные об эффективности этого процесса. Авторы технологии явно указывают на далеко неполную эффективность процесса, поскольку прямо сообщают, что комбинация метода с хлорированием и методом ультрафиолетового воздействия на среду значительно повышает его эффект [5], что является вполне объяснимым, поскольку в описании метода присутствует упоминание о неравномерном характере распределения электромагнитного поля внутри трубопровода, а значит и неравномерности зарядки личинок моллюска дрейссена отрицательными электрическими зарядами, наличия положительного заряда стенок трубопровода и других эффектах, которые препятствуют обеспечению высокой технологической эффективности метода.

Скорее всего, в связи с ограниченностью эффективности метода, последнее и единственное упоминание о его применении для подавления личинок моллюска дрейссена на промышленном объекте (Назаровская ГРЭС)

в том числе замену конденсаторных сборок, эффективный непрерывный срок работы таких устройств может составлять 7–8 лет и значительно более, вплоть до 60 лет, что эквивалентно 85000–500000 часов непрерывной работы [3].

Показатель наработки на отказ для ультрафиолетовой лампы составляет 2000–7000 часов для лучших отечественных ультрафиолетовых ламп или 8000–12000 часов для лучших зарубежных [4]. При этом необходимо учитывать плавную нелинейную деградацию ультрафиолетовой лампы в течение всего срока её работы, вплоть до потери 90 % эффективности излучающих элементов.

датируется 2012 годом. Дальнейшее упоминание в открытых источниках о применении этого метода для этих целей не просматривается.

Отдельному рассмотрению подлежит метод воздействия на воду мощными электромагнитными импульсами, имеющими определенную форму, мощность и частоту излучения.

Воздействие электромагнитного излучения происходит на поток воды, скорость которого может достигать нескольких метров в секунду. Электроимпульсное оборудование применяется для водоподготовки преимущественно технической воды и обеззараживания сточных вод в больших объемах, что требует существенных затрат на излучающую систему комплексов.

Это приводит к тому, что применение метода для обеззараживания воды в бытовых условиях или в малых объемах для других задач становится экономически не столь обоснованным, но для решения промышленного класса задач этот метод пока не имеет равных по своим техническим и экономическим параметрам.

Начало разработки применения этого метода для задач водоочистки было положено в НИИ Высоких Напряжений – г. Томск. Основным производителем комплексов в настоящее время является группа компаний «Аркон Технология», РФ. Технология полностью разработана на российских предприятиях и работает на оборудовании, применяемом, в том числе в радиолокационных системах.

За счет аэрации воды любыми газами – атмосферным воздухом, метаном, азотом или любым иным (в зависимости от конечных нужд потребителя) и подачи электроимпульсного воздействия на среду достигается прохождение мощных физико-химических процессов, преимущественно на среде раздела газ–вода. Это приводит к возникновению в потоке воды мощных попутных процессов и излучений – термобарического, ультразвукового, ультрафиолетового, озонового и некоторых других. Как следствие, происходит деструкция сложных соединений, в том числе органических, и практически полное биологическое обеззараживание водной среды [6].

Перечисленные воздействия и излучения с вероятностью, близкой к 100 %, полностью разрушают не только различные органические соединения, но и приводят к прохождению окислительных и некоторых иных химических реакций с вовлечением в химические реакции как самой воды, так и значительного количества различных химических элементов, находящихся в ней. Поскольку в химические процессы, происходящие в зоне облучения, вовлечен растворенный в воде кислород, коррозионные свойства воды после ее обработки должны снижаться.

Производительность оборудования, основанного на применении этого метода, высокая. Одна облучающая ячейка, имеющая предельно простую конструкцию, может обеспечивать обеззараживание от 60 до 1500 м³ воды в сутки (при непрерывной работе). Срок непрерывной эксплуатации излучателей – 15 лет и более.

Мутность воды и присутствие в ней мелкой взвеси на эффективность метода влияния не оказывают.

Поскольку процесс эксплуатации таких комплексов не ставит целью сброс промывочных вод, дополнительное негативное воздействие на среду отсутствует.

За счет простоты конструкции излучающих ячеек и скорости управления процессами излучения и параметрами импульсов оборудование обладает высокими параметрами регулируемости. Эффективность бактериологического обеззараживания очень высокая. Стандартные показатели бактериологического обеззараживания – 99,5–99,8 %. Допускается использование данного метода как единственного в технологической цепочке для подготовки питьевой воды, хотя применение методов пролонгированного обеззараживания при прохождении потока воды по ранее загрязненным трубопроводам является обоснованным.

Экономические показатели метода самые эффективные из существующих, что обеспечивается минимальными потерями подводимой энергии в системе.

Излучатели, применяемые в оборудовании, использующем электроимпульсное излучение, имеют показатели конверсии электрической энергии на уровне 90–95 %. При этом проникаемость электромагнитных импульсов применяемой частоты, формы и мощности в водной среде составляет десятки сантиметров и устойчиво обеспечивает воздействие на водную среду нужной мощности на большую глубину (до 100–120 см), недоступную для других методов.

К дополнительным затратам могут относиться энергетические затраты на насосное оборудование.

Монтаж производится путем врезки в существующие трубопроводы. Врезка производится путем фланцевых соединений. Повсеместно требуется монтаж в единичном месте. Стоимость монтажных работ приблизительно равна 17 % от стоимости поставляемого оборудования.

Наличие промывочной системы не требуется.

Система энергообеспечения (система генерации импульсов) вынесена во внешний блок и интегрирована с системой управления и автоматизации, что повышает ремонтпригодность оборудования. Система управления и автоматизации имеет внешнюю компоновку с размещением в вынесенном блоке с компьютерным управлением.

Капитальные затраты (CAPEX) по применяемым технологическим комплексам приблизительно в 2 раза ниже, по сравнению с технологическими комплексами, использующими ультрафиолетовое излучение. Монтаж готовых комплексов является технически простым, хотя и требует привлечения сертифицированной компании, обладающей штатом квалифицированных специалистов.

Эксплуатационные затраты (OPEX) рассматриваемого метода являются самыми низкими из всех известных и имеют показатели приблизительно в 10 раз ниже по сравнению с технологическими комплексами, использующими ультрафиолетовое излучение. Величина эксплуатационных расходов носит практически линейный характер и непосредственно коррелирует с объемом обрабатываемой воды.

Получены подтверждения многократного внедрения данного метода для решения задач по водоподготовке – обеззараживанию питьевой воды на нефтегазовых месторождениях (поселок Стрежевой, Томской области), для водоподготовки речной воды (водозабор реки Томь) в поселке Тайга (Кемеровская область), включающей как задачу биообеззараживания, так и задачу разложения фенолов, находящихся в речной воде после сброса про-

мышленных отходов предприятий. Последнее доказывает эффективность метода для разложения сложных органических веществ, в том числе ароматических.

Базирующееся на применении данного метода оборудование, а именно применение торцевых перемещаемых внутри трубопроводов электроимпульсных излучателей, промышленно применялось для очистки систем трубопроводов городской сети водоснабжения от нерастворимых солевых отложений (г. Томск) и было включено в государственную программу очистки водопроводных магистралей, не подлежащих замене.

Данное применение является сходным с задачей очистки биообрастания различного происхождения в трубопроводах различных гидросистем.

Также данную технологию в оборудовании различной комплектации применяют для обеззараживания стоков сельскохозяйственных предприятий, занимающихся выращиванием крупного рогатого скота и птицы. При этом ставилась задача разложения органических примесей, находящихся в стоках, до оксидов и других инертных нетоксичных соединений.

Помимо этого, оборудование, использующее метод электромагнитного импульсного воздействия на воду различного происхождения, применялось для разложения остатков эмульсий нефти и нефтепродуктов с целью повышения качества воды и доведения ее до требований СанПиН и ГН (гигиенических нормативов) РФ для категорий «вода питьевая» и «вода техническая».

Данная технология перспективна для решения задач снижения биообрастания технологического и гидротехнического оборудования.

Целесообразно проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, направленных на подбор технических параметров и выработки наиболее эффективных регламентов и методик применения технологии обеззараживания и предотвращения биообрастания в водных средах различного происхождения (пресная, морская, оборотная и т.д.).

Заключение

На основании анализа представленной и систематизированной в настоящей статье информации можно сделать следующие выводы о преимуществах обеззараживания воды методом электроимпульсного излучения в сравнении с методами ультрафиолетового и ультразвукового обеззараживания воды:

1. Обеззараживание воды электроимпульсным излучением имеет методологическое преимущество, поскольку обеспечивает широкополосное воздействие излучения на все биологические системы. Воздействие обеспечивает деструкцию как сложных биологических систем, так и широкого ряда органических веществ. Неорганические вещества под воздействием электроимпульсного воздействия вступают в доступные для них химические реакции, что определяется стехиометрией реакций.

2. Метод электроимпульсного обеззараживания является технологически нечувствительным к оптическим свойствам воды и не требует очистки воды от примесей.

3. Отсутствует необходимость производить постоянную чистку излучающих элементов (как это требуется в методе ультрафиолетового обез-

зараживания), что приводит к отсутствию требований по обеспечению слива сточных вод.

4. Управляемость электроимпульсным методом является гораздо более высокой, поскольку возможно управление не только мощностью и длительностью, но и частотой излучения, а также формой и длительностью импульсов, в то время как пределы управляемости процессами обеззараживания ультрафиолетовым излучением ограничиваются управлением мощности излучения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Владимиров Ю.А., Потапенко А.Я.** Физико-химические основы фото-биологических процессов. М.: Дрофа, 2006.
2. https://ru.wikipedia.org/wiki/Ультрафиолетовое_излучение#Воздействие
3. <https://wartz.pro>
4. **Рентюк В.** Зависимость времени наработки на отказ электролитических конденсаторов от реальных условий их эксплуатации // Вестник электроники. 2014. № 3 (49).
5. https://xenozone.ru/assets/files/documents/passports/uvu/UVU-50_basic.pdf?ysclid=lmbutmq5yx354084812
6. <https://textarchive.ru/c-2397967.html>
7. <https://panor.ru/articles/vodoochistnoy-kompleks-impuls/89644.html?ysclid=lm8g49unh487504815#>

REFERENCES

1. Vladimirov Yu.A., Potapenko A.Ya. Physical and chemical foundations of photo-biological processes. M.: Drofa, 2006. (In Russ.).
2. https://ru.wikipedia.org/wiki/Ультрафиолетовое_излучение#Воздействие
3. <https://wartz.pro>
4. Rentyuk V. Dependence of the operating time for failure of electrolytic capacitors on the real conditions of their operation. *Bulletin of Electronics*. 2014. № 3 (49). (In Russ.).
5. https://xenozone.ru/assets/files/documents/passports/uvu/UVU-50_basic.pdf?ysclid=lmbutmq5yx354084812
6. <https://textarchive.ru/c-2397967.html>
7. <https://panor.ru/articles/vodoochistnoy-kompleks-impuls/89644.html?ysclid=lm8g49unh487504815#>

Информация об авторах

М.Н. Уразаев – технический директор, руководитель технологических проектов в области водоподготовки;

И.М. Царовцева – канд. биол. наук, ведущий научный сотрудник;

Л.Э. Беллендир – зав. лабораторией.

Information about the authors

M.N. Urazaev – Technical Director, Head of Technological projects in the field of water treatment;

I.M. Tsarovtseva – Ph.D. biol. sciences, Lead Researcher;

L.E. Bellendir – Head of Laboratory.

Статья поступила в редакцию 20.10.2023; одобрена после рецензирования 02.11.2023; принята к публикации 20.12.2023.

The article was submitted 20.10.2023; approved after reviewing 02.11.2023; accepted for publication 20.12.2023.

Научная статья
УДК 532.51

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧ ГИДРОДИНАМИКИ МЕТОДОМ РЕШЕТОЧНЫХ УРАВНЕНИЙ БОЛЬЦМАНА

Артем Владимирович Шияев

АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», Санкт-Петербург, Россия, shilyaevav@vniig.ru

Аннотация. Описаны основные принципы построения моделей на основе решеточных уравнений Больцмана. Рассмотрена базовая реализация метода решеточных уравнений Больцмана с граничными условиями обратного отскока для математического моделирования задач гидродинамики. Проведено сравнение результатов расчета на описанной модели с экспериментальными данными и данными математического моделирования, полученными на традиционной модели.

Ключевые слова: уравнение Больцмана, вычислительная гидродинамика, математическое моделирование

Для цитирования: Шияев А.В. Моделирование задач гидродинамики методом решеточных уравнений Больцмана // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2023. Т. 310. С. 72–77.

Original article

COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS USING LATTICE BOLTZMANN METHOD

Artem V. Shilyaev

JSC «Vedeneev VNIIG», Saint Petersburg, Russia, shilyaevav@vniig.ru

Abstract. The basic principles of constructing models based on lattice Boltzmann equations are described. The simplest implementation of the lattice Boltzmann method with bounce-back boundary conditions for computational hydrodynamics is considered. The calculation results on the described model are compared with experimental data and numerical modeling data obtained on the traditional model.

Key words: Boltzmann equation, computational fluid dynamics, numerical modeling

For citation: Shilyaev A.V. Computational fluid dynamics using lattice Boltzmann method. *Proceedings of the VNIIG*. 2023;310:72-77. (In Russ.).

Введение

Метод решеточных уравнений Больцмана (*Lattice Boltzmann Method, LBM*) – относительно новый и перспективный метод решения задач моделирования гидро- и аэродинамики. Основными преимуществами *LBM*, по сравнению с другими методами вычислительной гидродинамики, являются относительная простота его алгоритма, возможность моделирования сложных сред (многофазных, многокомпонентных), возможность моделирования обтекания сложных поверхностей (пористые среды, сложные геометрии).

Суть *LBM* состоит в значительном упрощении первоначальной концепции Больцмана, описывающей функцию распределения плотности вероятности микрочастиц по координатам и по скоростям, путем перехода от микрочастиц к виртуальным «мезачастицам» (совокупность, кластер микрочастиц) и дискретизации непрерывных величин. Таким образом, бесконечное число возможных пространственных положений частиц сокращается до довольно большого, но конечного количества узлов решетки. То есть, каждая частица в *LBM* может находиться только в определенном узле решетки, либо передвигаться дискретными «прыжками» по узлам решетки. Бесконечное разнообразие импульсов частиц, которое обусловлено наличием бесконечного количества направлений и величин скорости и различной массы частиц, уменьшается до нескольких значений. Например, в двумерной модели *D2Q9* (по классификации [1]) используется 9 возможных состояний частиц: 8 возможных направлений движения и одно состояние покоя.

Расчетная сетка, набор скоростей и основные уравнения *LBM*

Скорости и направления движения частиц, как и шаг по времени (Δt), выбираются таким образом, что за Δt частица может переместиться только на один из соседних узлов решетки или остаться на месте. На рис. 1 показана декартова решетка модели *D2Q9* и вектора скорости e_i , где $i = 0, 1, \dots, 8$ – индекс направления, а для e_0 предполагается, что частица находится в покое. Таким образом, в моделях *LBM* единица длины решетки (lu) является фундаментальной мерой длины, а шаг по времени (ts) является единицей времени.

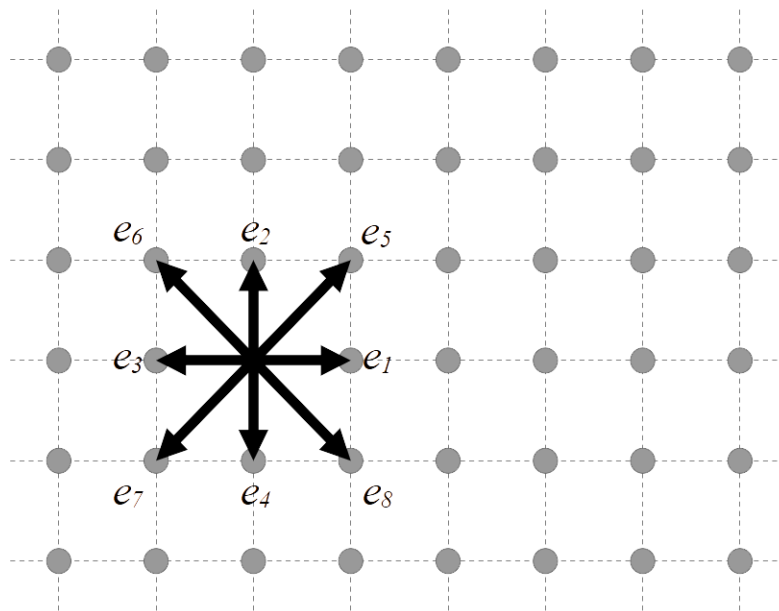


Рис. 1. Решетка и векторы скоростей модели *D2Q9*

В перечисленных условиях можно записать уравнение Больцмана в приближении Батнагара-Гросса-Кука [2], при условии шага по времени $\tau=1$ и при отсутствии внешних сил, следующим образом [3]

$$f_i(\mathbf{r} + \mathbf{e}_i, t + 1) - f_i(\mathbf{r}, t) = -\frac{f_i - f_i^{eq}}{\tau}, \quad (1)$$

где f_i – функция распределения частиц по скоростям в узле решетки; \mathbf{r} – координаты узла; f_i^{eq} – равновесная функция распределения; τ – время релаксации, зависящее от кинематической вязкости жидкости из соотношения $\nu = 1/3(\tau - 1/2)$.

Левую часть уравнения (1) обычно называют потоковой частью или *Streaming Step*, правую – частью столкновений или *Collision Step*. Во время *Streaming Step* частицы перераспределяются по узлам решетки в соответствии со своими векторами скорости, во время *Collision Step* обрабатываются столкновения между частицами (либо границами модели), иными словами, происходит релаксация функции распределения до локального равновесия.

Равновесная функция распределения, согласно [1], равна

$$f_i^{eq} = w_i \rho \left(1 + 3e_i \mathbf{u} + \frac{9}{2} (e_i \mathbf{u})^2 - \frac{3}{2} \mathbf{u}^2 \right), \quad (2)$$

где $\rho = \sum_i f_i$ – макроскопическая плотность в узле, $\rho \mathbf{u} = \sum_i f_i e_i$ – макроскопическая скорость в узле, средневзвешенная с учетом функции распределения f_i , а w_i – решеточные веса (весовые коэффициенты), которые равны $4/9$ для покоящихся частиц ($i=0$), $1/9$ для $i=1,2,3,4$ и $1/36$ для $i=5, 6, 7, 8$.

Показанная выше модель, описываемая уравнениями (1) и (2), является, по сути, базовой конструкцией всех моделей *LBM*. Для проведения моделирования задач с обтеканием твердых тел чаще всего применяются граничные условия обратного отскока, предложенные в работе [4] – условие, при котором частицы, пересекающие границу твердого тела, возвращаются обратно в узел, из которого они пришли, тем самым эффективно реализуя условие прилипания.

Реализация модели и результаты расчетов

Программная реализация модели, описываемой уравнениями (1) и (2), с учетом граничных условий обратного отскока в виде модели *D2Q9* (двумерная модель с набором из 9 скоростей) позволяет производить математическое моделирование задач обтекания твердых тел в двумерной постановке при небольших числах Рейнольдса (примерно до 2000). Ограничение на значение числа Рейнольдса обусловлено стабильностью базового оператора столкновений в правой части уравнения (1). Существуют методики, снимающие подобные ограничения, однако это вопрос реализации более продвинутых моделей *LBM*, а данная статья посвящена описанию именно базовой модели.

Результаты расчета

1. Расчетный случай с числом Рейнольдса $Re=26$ (рис. 2).
2. Расчетный случай с числом Рейнольдса $Re=105$ (рис. 3).

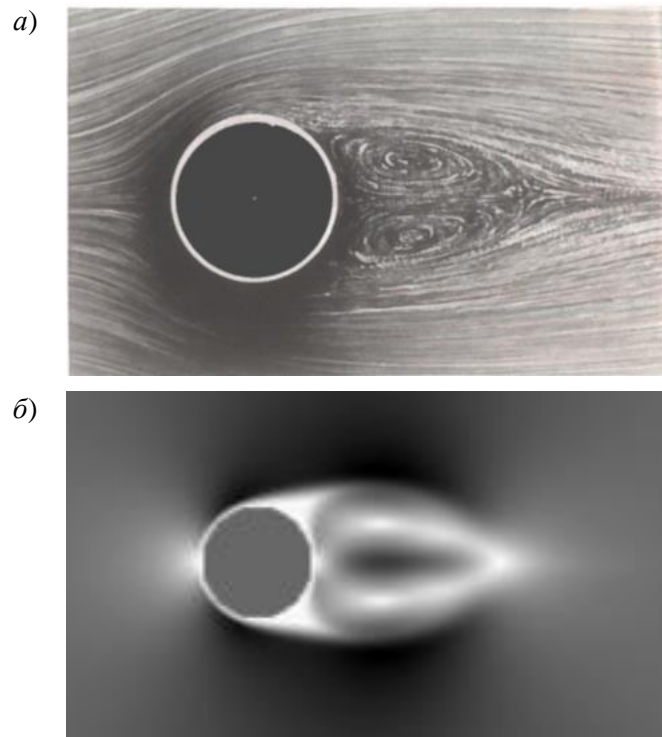


Рис. 2. Обтекание цилиндра при $Re=26$. Экспериментальные данные (а) и расчет на модели *LBM*, реализованной в рамках данной работы (б)

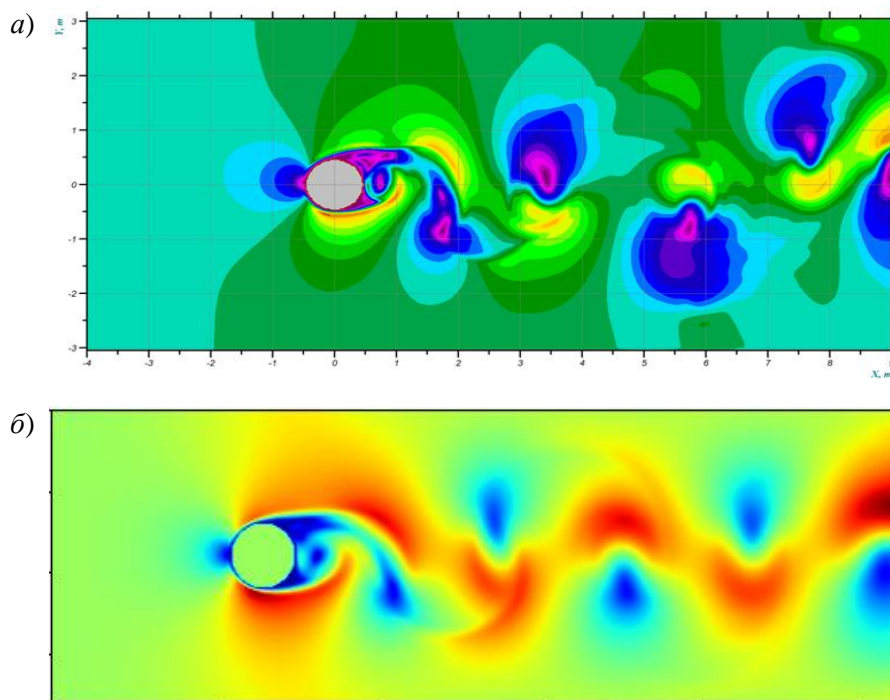


Рис. 3. Обтекание цилиндра при $Re=105$. Расчет на математической модели [5] (а) и расчет на модели *LBM*, реализованной в рамках данной работы (б)

Результаты расчета, приведенные на рис. 2 и 3, показывают, что даже простейшая базовая модель *LBM* дает вполне адекватные с физической точки зрения результаты. Видно, что в задаче обтекания цилиндра при числе Рейнольдса $Re=26$ так же, как и в эксперименте, за цилиндром образуются две водоворотные области, при этом так же, как и в эксперименте, с ростом числа Рейнольдса вихри за цилиндром вытягиваются в направлении потока, причем расстояние до центра вихрей растет линейно с ростом скорости потока. При числе Рейнольдса $Re=105$ так же, как и в расчетах на многократно апробированной и широко применяемой математической модели [5], образуется отчетливая дорожка Кармана с последовательно удаляющимися от цилиндра вихрями поочередно слева и справа от оси модели.

Заключение

Применение описанного в статье подхода в значительной степени упрощает и в целом делает возможным проведение компьютерного моделирования потока вещества с точки зрения физики микроскопических процессов таким образом, чтобы макроскопические усредненные свойства системы подчинялись желаемым макроскопическим уравнениям. Причина, по которой возможно использовать упрощенные кинетические модели, заключается в том, что макроскопическая динамика жидкости является результатом коллективного поведения многих микроскопических частиц в системе, то есть при бесконечно малом шаге времени и шаге пространственной решетки дискретная система *LBM* перейдет в обычное уравнение Больцмана, которое, в свою очередь, в макроскопическом пределе переходит к уравнению Навье-Стокса [3, 6].

В силу своих особенностей, метод *LBM* хорошо подходит для распараллеливания вычислений на большое число потоковых процессоров, как, например, в графических ускорителях. Из-за несколько большей ресурсоемкости одного временного шага расчетов для *LBM* он показывает сравнимую производительность с классическими методами вычислительной гидродинамики при производстве вычислений на CPU [7, 8], однако при переходе *LBM* на GPU достижимо ускорение до 95 раз [8]. Помимо этого, значительное ускорение расчетов *LBM* может быть получено с использованием разработанных алгоритмов локального уточнения (сгущения) сетки [9].

Адаптация метода для моделирования потока на гидротехнических сооружениях позволит на порядки увеличить скорость и качество вычислений, что особенно полезно в задачах, где требуется проводить множество симуляций подряд, например, в задачах выбора оптимальной конструкции и в перспективе позволит решать некоторые «проблемные» для классических методов задачи, такие как задачи транспорта наносов или задачи обтекания сложных поверхностей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Qian Y.H., D'Humières D., Lallemand P. Lattice BGK models for Navier-Stokes equation. *Europhys Lett*, 17, 1992, P. 479-484.
2. Bhatnagar P.L., Gross E.P., Krook M. A Model for Collision Processes in Gases. I. Small Amplitude Processes in Charged and Neutral One-Component Systems // *Physical Review*. 1954. 94 (3): 511–525.

3. **Chen S., Doolen G.D.** Lattice Boltzmann method for fluid flows // *Annual Review of Fluid Mechanics*. 1998. 30, P. 329–364.
4. **Zou Q., He X.** On pressure and velocity boundary conditions for the lattice Boltzmann BGK model // *Physics of Fluids*. 1997. 9(6):1591.
5. **Прокофьев В.А.** Современные численные схемы на базе метода контрольного объёма для моделирования бурных потоков и волн прорыва // *Гидротехническое строительство*. 2002. № 7. С. 22-29.
6. **He X., Luo L.-S.** Theory of the lattice Boltzmann method: from the Boltzmann equation to the lattice Boltzmann equation // *Physical Review E*, 55. 1997. P. 6811–6817.
7. **Wichmann K.-R.K.** Performance Aspects of Incompressible Navier-Stokes Solvers: Lattice-Boltzmann Method vs. Finite Difference Method. Dissertation // Technische Universität München, 2019.
8. **Ghadyani M., Esfahanian V., Iman Gohari S.M.** Comparison of GPU Accelerated Schemes of LBM and Classical CFD for Flow over a Flat Plate / 14th Conference On Fluid Dynamics, 2012.
9. **Depuis A., Chopard B.** Theory and applications of an alternative lattice Boltzmann grid refinement algorithm // *Physical Review E*. 2003. 67(6), P. 1.

REFERENCES

1. Qian Y.H., D'Humières D., Lallemand P. Lattice BGK models for Navier-Stokes equation. *Europhys Lett*, 17, 1992, P. 479-484.
2. Bhatnagar P.L., Gross E.P., Krook M. A Model for Collision Processes in Gases. I. Small Amplitude Processes in Charged and Neutral One-Component Systems // *Physical Review*. 1954. 94 (3): 511–525.
3. Chen S., Doolen G.D. Lattice Boltzmann method for fluid flows // *Annual Review of Fluid Mechanics*. 1998. 30, P. 329–364.
4. Zou Q., He X. On pressure and velocity boundary conditions for the lattice Boltzmann BGK model // *Physics of Fluids*. 1997. 9(6):1591.
5. Prokofiev V.A. Modern numerical schemes based on the control volume method for modeling violent flows and breakthrough waves. *Gidrotekhnicheskoye stroitel'stvo – Power Technology and Engineering*. 2002;7: 22-29. (In Russ).
6. He X., Luo L.-S. Theory of the lattice Boltzmann method: from the Boltzmann equation to the lattice Boltzmann equation // *Physical Review E*, 55. 1997. P. 6811–6817.
7. Wichmann K.-R.K. Performance Aspects of Incompressible Navier-Stokes Solvers: Lattice-Boltzmann Method vs. Finite Difference Method. Dissertation // Technische Universität München, 2019.
8. Ghadyani M., Esfahanian V., Iman Gohari S.M. Comparison of GPU Accelerated Schemes of LBM and Classical CFD for Flow over a Flat Plate / 14th Conference On Fluid Dynamics, 2012.
9. Depuis A., Chopard B. Theory and applications of an alternative lattice Boltzmann grid refinement algorithm // *Physical Review E*. 2003. 67(6), P. 1.

Информация об авторе

А.В. Шиляев – ведущий инженер.

Information about the authors

Artem V. Shilyaev – Lead Engineer.

Статья поступила в редакцию 11.09.2023; одобрена после рецензирования 08.11.2023; принята к публикации 20.12.2023.

The article was submitted 11.09.2023; approved after reviewing 08.11.2023; accepted for publication 20.12.2023.

Научная статья
УДК 624.2/8

АНАЛИТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ КОЛЕБАНИЙ В ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ ПРОЛЁТНЫХ СТРОЕНИЙ МОСТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ

Александр Павлович Кузьменко¹, Владимир Сергеевич Сабуров²

^{1, 2} Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий (ФИЦ ИВТ), Новосибирск, Россия

¹ apkuzm@gmail.com

² saburov58@yandex.ru

Аннотация. Рассматривается возможность использования аналитических моделей колебаний пролётных строений мостов с целью оценки упругих характеристик конструкций мостовых сооружений в горизонтальной плоскости.

Ключевые слова: сейсмометрический мониторинг, детальное сейсмометрическое обследование, формы и частоты собственных колебаний, обратная спектральная задача

Для цитирования: Кузьменко А.П., Сабуров В.С. Аналитические модели колебаний в горизонтальной плоскости пролётных строений мостовых сооружений // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2024. Т. 310. С. 78–100.

Original article

ANALYTICAL MODELS OF FLUCTUATIONS IN THE HORIZONTAL PLANE OF SUPERSTRUCTURES BRIDGE STRUCTURES

Alexander P. Kuzmenko¹, Vladimir S. Saburov²

^{1, 2} Federal Research Center for Information and Computational Technologies (FRCICT),
Novosibirsk, Russia

¹ apkuzm@gmail.com

² saburov58@yandex.ru

Abstract. The possibility of using analytical models of vibrations of bridge spans is considered in order to assess the elastic characteristics of bridge structures in the horizontal plane.

Keywords: *seismometric monitoring, detailed seismometric survey, forms and frequencies of natural oscillations, inverse spectral problem*

For citation: Kuzmenko A.P., Saburov V.S. Analytical models of fluctuations in the horizontal plane of superstructures bridge structures. *Proceedings of the VNIIG. 2023;310:78-100.* (In Russ.).

Статья представляет продолжение публикации [1], в которой приведён пример статических и динамических испытаний двухпролётной балочной конструкции и публикации [2], в которой рассматриваются результаты исследований вертикальных колебаний пролётных строений мостов (динамические испытания) различного конструктивного исполнения.

© Кузьменко А.П., Сабуров В.С., 2023

Установление текущего технического состояния конструкций мостовых сооружений в основном предусматривает проведение исследований по определению реакции на статические и динамические нагрузки пролётных строений в вертикальном направлении, что в основном связано с направлением основных и временных статических и динамических, наиболее значимых по величине, нагрузок. Горизонтальные нагрузки (ветровая, центробежная, тормозная, поперечные толчки и удары подвижной нагрузки) по величине значительно меньше вертикальных нагрузок и воздействий, поэтому устойчивости мостовых сооружений в горизонтальной плоскости уделяется меньше внимания.

Исследование реакции конструкций мостовых сооружений в горизонтальной плоскости показывает, что в большинстве случаев полученные данные позволяют значительно повысить достоверность заключения о техническом состоянии мостовых сооружений, точность определения резервов надежности и обоснования проведения ремонтных работ. Поэтому при создании системы контроля технического состояния мостовых сооружений контроль реакции моста в горизонтальной плоскости должен являться частью системы обеспечения безопасности в процессе эксплуатации.

В статье приведены результаты инженерно-сейсмометрических исследований четырёх мостовых сооружений (результаты динамических испытаний в горизонтальной плоскости):

моста рамно-балочной конструкции с тремя опорами в виде Т-образных рам и четырьмя разрезными подвесными пролетными строениями;

двух мостов с цельнометаллическими (стальными) неразрезными пролетными строениями с ортотропной плитой проезжей части, шарнирно опёртыми на устои и промежуточные опоры;

вантовой части моста, которая представляет собой неразрезную балку жёсткости, поддерживаемую в больших пролётах двумя плоскостями вант из стальных канатов.

Измерение значений частот и построение эпюр форм собственных колебаний пролётных строений в горизонтальной плоскости обследуемых мостовых сооружений осуществлялось согласно положениям инженерно-сейсмометрического метода неразрушающего контроля [3, 4] с помощью программ Геотон-А и Геотон-Т [5, 6]. Точность измерения собственных частот колебаний пролётных строений составляла $\Delta f = \pm 0,0156$ Гц.

Идентификация форм собственных колебаний пролётных строений, а также оценка упругих характеристик мостовых сооружений в горизонтальной плоскости осуществлялась в рамках аналитических моделей поперечных и продольных колебаний как однопролётной, так и многопролётной балок [7, 8]. При этом использовались модели либо с фиксированными граничными условиями или одним определяемым (изменяемым) параметром [2], либо с количеством определяемых параметров, которое не превышало количество измеренных частот собственных колебаний пролётных строений.

Аналитическая модель (далее модель) считалась адекватной [9, 10], если разность частот модели и пролётных строений не превышала заданной величины, которая определялась ошибкой измерения частот, а эпюры форм собственных колебаний модели соответствовали эпюрам форм собственных колебаний пролётных строений. На практике обычно модель

считается адекватной, если расхождение между численными результатами моделирования и эксперимента не превышает 10 %. Однако в процессе исследований было установлено, что для получения практически значимого результата значения собственных частот колебаний пролётных строений и модели не должны отличаться более, чем на три процента.

К факторам, затрудняющим определение частот и построение эпюр форм собственных поперечных и продольных колебаний пролётных строений в горизонтальной плоскости, можно отнести:

колебания пролётных строений в горизонтальной плоскости на резонансных частотах слабо выражены по амплитуде на фоне шумовых вибраций, что является причиной выделения малого количества собственных частот колебаний в горизонтальной плоскости;

спектры колебаний содержат ярко выраженные по амплитуде спектральные пики, соответствующие деформационным колебаниям от вертикальной компоненты [4], которые подавляют собственные колебания пролётных строений в горизонтальной плоскости.

Автодорожный мост через р. Иню (г. Новосибирск)

Мост рамно-балочной конструкции с тремя опорами в виде Т-образных рам и четырьмя разрезными подвесными пролетными строениями из преднапряженных железобетонных балок таврового сечения, соединенных в ортотропную плиту проезжей части и шарнирно опертых на консоли рам и береговые устои. В продольном направлении разрезное пролётное строение моста организовано по схеме 33,5+2×42+33,5 м.

Аварийное состояние моста на момент обследования затрудняло определение частот и форм собственных колебаний четырёхпролётного строения моста, так как на спектрах фиксировались многочисленные спектральные пики локальных резонансных колебаний отдельных групп балок. Согласно визуальным наблюдениям наиболее разрушенная сторона моста соответствует низовой ветви.

Поперечные колебания пролётных строений моста в горизонтальной плоскости (вдоль потока). Карты комплексного спектра передаточной функции и эпюры смещений на резонансных частотах поперечных колебаний пролётных строений моста, соответствующие профилю наблюдения низовой ветви моста, приведены на рис. 1.

Спектр передаточной функции и эпюры форм колебаний пролётных строений на резонансных частотах соответствуют спектру и формам собственных изгибных колебаний однопролётной балки на упругих опорах. На амплитудном спектре передаточной функции спектральные пики резонансных частот поперечных колебаний имеют до трёх локальных максимумов, которые соответствуют поперечным резонансным колебаниям отдельных групп балок четырёхпролётного строения. На основании вида эпюр поперечных смещений пролётных строений, идентификация форм собственных колебаний пролётных строений осуществлена в рамках модели изгибных колебаний однопролётной балки, жёстко закреплённой относительно поперечных и угловых перемещений в правом опорном сечении и жёстко закреплённой относительно поперечных и упруго относительно угловых перемещений в левом (см. рис. 1, б).

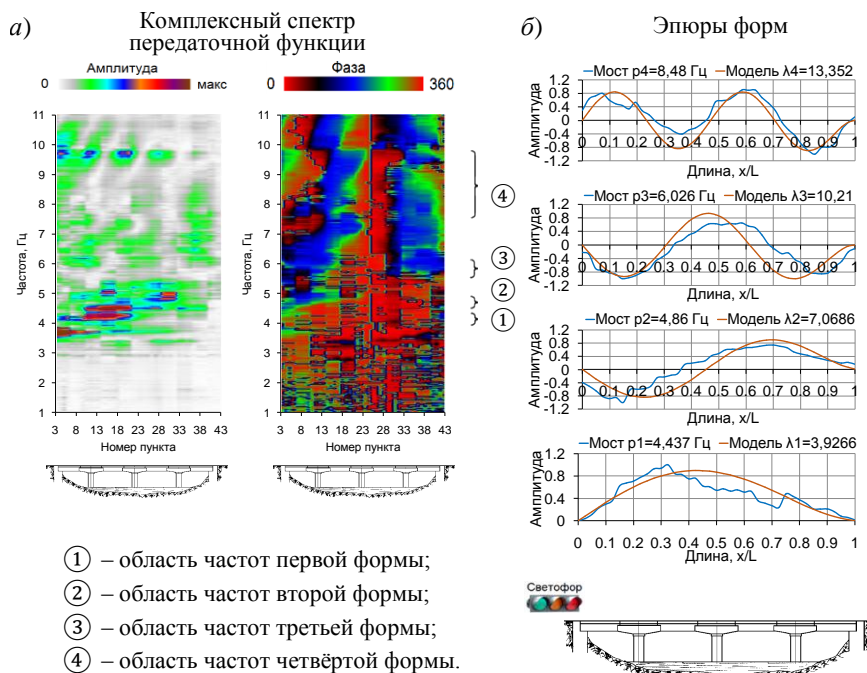


Рис. 1. Диаграммы (мост через р. Иню, профиль наблюдения по нижней ветви моста):
 а – карты комплексного спектра передаточной функции поперечных колебаний (амплитуд и фаз);
 б – эпюры поперечных смещений пролётных строений и модели на частотах собственных колебаний

Частотное уравнение и выражение эпюры j -й формы $Y_j(\xi)$ собственных изгибных колебаний данной модели определяются формулами [7]:

$$\mu[1 - ch(\lambda_j)\cos(\lambda_j)] + 2\lambda_j[ch(\lambda_j)\sin(\lambda_j) - sh(\lambda_j)\cos(\lambda_j)] = 0, \quad (1)$$

$$Y_j(\xi) = Y_{0j} \left\{ V(\lambda_j\xi) - \frac{V(\lambda_j)}{\lambda_j T(\lambda_j) + \mu U(\lambda_j)} [\lambda_j T(\lambda_j\xi) + \mu U(\lambda_j\xi)] \right\}, \quad (2)$$

где λ_j – корни частотного уравнения (1); $S(\lambda_j\xi) = 0,5[ch(\lambda_j\xi) + \cos(\lambda_j\xi)]$,
 $T(\lambda_j\xi) = 0,5[sh(\lambda_j\xi) + \sin(\lambda_j\xi)]$, $U(\lambda_j\xi) = 0,5[ch(\lambda_j\xi) - \cos(\lambda_j\xi)]$,
 $V(\lambda_j\xi) = 0,5[sh(\lambda_j\xi) - \sin(\lambda_j\xi)]$ – функции Крылова; $\lambda_j^4 L^4 = \frac{m\omega_j^2}{EI}$; ω_j – j -я частота собственных форм колебаний, рад/с; $\xi = \frac{x}{L}$ – безразмерная координата; L – длина балки (моста), м; EI – жёсткость сечения балки простому изгибу, тс·м²; $\mu = \frac{K_\varphi L}{EI}$ – безразмерный коэффициент жёсткости опор угловым перемещениям; K_φ – жёсткость в опорном сечении угловым перемещениям, тс·м; m – погонная масса, тс·с²/м².

Сопrotивление опор поперечным перемещениям пролётных строений, а также не синхронные перемещения отдельных групп балок учитывались как отпорность условного упругого полупространства, поэтому частоты собственных колебаний определялись согласно выражению

$$p_j = \sqrt{a\lambda_j^4 + b}, \quad (3)$$

$$\text{где } a = \frac{EI}{4\pi^2 mL^4}, \quad b = \frac{k_{S\perp\parallel}}{4\pi^2 m}.$$

Ошибка аппроксимации спектра собственных частот колебаний пролётных строений спектром (рядом) собственных частот колебаний модели определялась согласно выражению

$$err = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (p_{\text{модель},j} - p_{\text{изм},j})^2}{N}}, \quad (4)$$

где $p_{\text{модель},j}$ и $p_{\text{изм},j}$ – собственные частоты модели и пролётных строений, соответственно; N – количество измеренных частот собственных колебаний пролётных строений.

Минимальная ошибка аппроксимации спектра собственных частот поперечных колебаний четырёхпролётного строения достигается при $\mu = 0$, что соответствует модели изгибных колебаний однопролётной балки, жёстко закреплённой в одном опорном сечении и шарнирно в другом. Пример результатов аппроксимации спектра собственных частот поперечных колебаний разрезного четырёхпролётного строения моста в горизонтальной плоскости (профиль наблюдения по низовой ветви моста) спектром собственных частот модели приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты аппроксимации частот спектра собственных поперечных колебаний пролётных строений низовой ветви моста через р. Иню

Частота, Гц		λ_j	Упругие характеристики
Мост	Модель, $p_j = \sqrt{a\lambda_j^4 + b}$		
4,437	$p_1 \approx 4,417$	3,9266	$a = \frac{EI}{4\pi^2 mL^4} \approx 0,00165, 1/c^2$ $b = \frac{k_{sh\parallel}}{4\pi^2 m} \approx 19,121, 1/c^2$ $EI \approx 5,66 \cdot 10^7, \text{тс} \cdot \text{м}^2$ $k_{sh\parallel} = 1358,76, \text{тс}/\text{м}^2$
4,86	$p_2 \approx 4,822$	7,0686	
6,026	$p_3 \approx 6,09$	10,210	
8,48	$p_4 \approx 8,466$	13,352	

Обозначения: $m = 1,8 \text{ тс} \cdot \text{с}^2/\text{м}^2$, $L = 148,2 \text{ м}$ – погонная масса и длина разрезного четырёхпролётного строения, соответственно;

$k_{sh\parallel}$ – отпорность на погонный метр длины балки условного упругого полупространства поперечному сдвигу поперёк оси моста, $\text{тс}/\text{м}^2$.

Оценка жёсткости поперечного сечения EI пролётного строения простому изгибу в горизонтальной плоскости произведена с учётом полной площади поперечного сечения пролётного строения.

В результате аппроксимации спектров собственных колебаний, соответствующих профилям центральной и верховой ветвям моста, были определены значения параметров $a \approx 0,00208$ и $b \approx 18,44 \div 18,71$. Поэтому можно утверждать, что группа балок низовой ветви моста обладает пониженной жёсткостью поперечного сечения простому изгибу по сравнению с группами балок центральной и верховой ветвей.

Для сравнения [2] среднее значение жёсткости поперечного сечения пролётных строений моста простому изгибу в вертикальном направлении составляет $EI \approx 2,3 \cdot 10^7 \text{ тс} \cdot \text{м}^2$ (значение приведено с учётом полной площади поперечного сечения пролётного строения).

Соотношение жесткостей в вертикальной и горизонтальной плоскостях соответствует плите с условной высотой $h = 1$ м и шириной $B = 1,57$ м, что характерно для отдельной балки таврового сечения, а не для ортотропной плиты моста высотой $h \approx 1,55$ м и шириной $B = 11,2$ м.

Различие значений собственных частот пролётных строений моста и модели в среднем составляет 0,62 %, поэтому точность определения упругих характеристик пролётных строений составляет порядка 1,25 % и удовлетворяет требованиям сейсмометрического мониторинга.

Продольные колебания пролётных строений моста (поперёк потока). Карты комплексного спектра передаточной функции и эпюры смещений на резонансных частотах продольных колебаний пролётных строений моста, соответствующие профилю наблюдения по низовой ветви моста, приведены на рис. 2. Спектр передаточной функции и эпюры форм колебаний пролётных строений на резонансных частотах соответствуют спектру и формам собственных продольных колебаний однопролётной балки на упругих опорах (см. рис. 2, а).

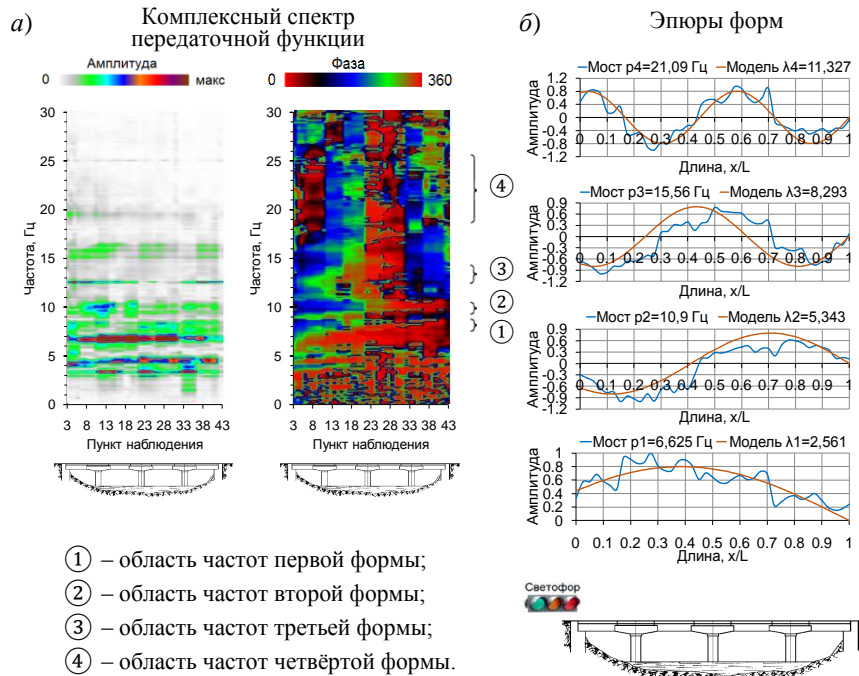


Рис. 2. Диаграммы (мост через р. Иню, профиль наблюдения по низовой ветви моста): а – карты амплитуд и фаз комплексного спектра передаточной функции продольных колебаний; б – эпюры форм продольных смещений пролётных строений и модели на частотах собственных колебаний

На амплитудном спектре передаточной функции, как и на спектре поперечных колебаний, в полосе частот одной формы колебаний пролётных строений наблюдаются не менее трёх локальных спектральных пиков, центральные частоты которых удовлетворяют условиям пространственно-временного резонанса, что является признаком собственных частот колебаний. Следует отметить, что существование нескольких частот собственных колебаний одной формы является признаком разделения ортотропной плиты вдоль полок тавра на отдельные группы балок.

Для большинства эпюр амплитуды продольных перемещений левобережного устоя гораздо больше, чем амплитуды правобережного (см. рис. 2, б). Поэтому идентификация форм собственных колебаний пролётных строений осуществлена в рамках модели продольных колебаний однопролётной балки, жёстко закреплённой в правом опорном сечении и соединённой пружиной жёсткостью k с неподвижной опорой в левом ($k_1 = k$, $k_2 = \infty$).

Частотное уравнение и выражение эпюры j -й формы $Y_j(\xi)$ собственных продольных колебаний модели определяются формулами [7]:

$$\eta \sin(\lambda_j) = -\lambda_j \cos(\lambda_j), \quad (5)$$

$$Y_j(\xi) = Y_{0j} \sin(\lambda_j \xi), \quad (6)$$

где λ_j – корни частотного уравнения (5); $\eta = \frac{kL}{EF}$ – безразмерный коэффициент упругой заделки балки в левом опорном сечении продольным перемещением; EF – жёсткость поперечного сечения балки (ортотропной плиты) сжатию-растяжению в продольном направлении, тс; k – жёсткость пружины, тс/м; L – длина балки (моста), м; $\xi = \frac{x}{L}$ – безразмерная координата.

Наилучшее совпадение частот собственных колебаний пролётных строений и модели достигается в рамках модели, учитывающей сопротивление опор продольным перемещениям как отпорность условного упругого полупространства (табл. 2). В результате вариации коэффициента η было установлено, что минимальная ошибка аппроксимации спектра частот и ординат эпюр форм собственных продольных колебаний, пролётных строений (профиль наблюдения по низовой ветви моста) достигается при значении $\eta \approx 3,9$. Результаты решения обратной спектральной задачи в рамках модели приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты аппроксимации частот спектра собственных продольных колебаний пролётных строений низовой ветви моста через р. Иню

Частота, Гц		λ_j	Упругие характеристики	Диаграммы изменения ошибки аппроксимации от коэффициента η
Мост	Модель $p_j = \sqrt{\lambda_j^2 a + b}$			
6,625	$p_1 \approx 6,61$	2,551	$a = 3,278; b = 22,462$ $\eta = 3,81; k = 1,34 \cdot 10^5$ тс/м $EF = 5,31 \cdot 10^6$ тс $k_{sh\perp} = 1,96 \cdot 10^3$ тс/м ²	
10,90	$p_2 \approx 10,76$	5,333		
15,56	$p_3 \approx 15,73$	8,285		
21,09	$p_4 \approx 21,04$	11,320		

Обозначения: $a = \frac{EF}{4\pi^2 L^2 m}$, $b = \frac{k_{sh\perp}}{4\pi^2 m} 1/c^2$; $m = 1,8$ тс·с²/м², $L = 151$ м – погонная масса и длина четырёхпролётного строения, соответственно; $k_{sh\perp}$ – отпорность на погонный метр длины балки условного упругого полупространства поперечному сдвигу вдоль оси моста, тс/м².

Различие собственных частот пролётных строений и рабочей модели в среднем составляет 0,71%, поэтому точность определения упругих характеристик пролётных строений составляет порядка 1,42%, что удовлетворяет условиям проведения мониторинга.

Обработка записей колебаний пролётных строений моста в горизонтальной плоскости позволила получить следующую дополнительную информацию об условиях сопряжения пролётных строений с береговыми устоями:

для продольных колебаний условие сопряжения пролётных строений с левобережным устоем определяется как упругое, с правобережным – как жёсткое;

для поперечных колебаний условие сопряжения пролётных строений с левобережным устоем определяется как шарнирное, с правобережным – как жёсткое.

Условия сопряжения указывают на наличие повышенной податливости узла сопряжения пролётного строения с левобережным устоем, что явилось основанием для проведения детального инженерно-сейсмического обследования. В результате было установлено, что аварийное состояние левобережного устоя обусловлено подмывом грунтового основания. К одной из причин повышенного износа конструкций левобережного устоя и низовой ветви моста можно отнести режим движения транспорта по проезжей части, регулируемый светофором, установленным на выезде с низовой ветви моста. В зависимости от интенсивности потока транспорта, часть транспортных средств вынуждена регулярно тормозить, а затем стартовать на проезжей части низовой ветви моста, в то время как верхнюю ветвь моста транспорт преодолевает без остановки.

Автодорожный мост через р. Туру (г. Тюмень)

Мост выполнен в виде балочной неразрезной системы с ездой поверху. Под каждое направление движения транспорта предусмотрены отдельные пролетные строения (верховая и низовая сплотки), которые представляют собой сталежелезобетонные неразрезные балочные системы с ортотропной плитой проезжей части. В продольном направлении неразрезное пролётное строение верховой сплотки моста организовано по схеме 63+84+126+84 м.

Поперечные колебания пролётных строений моста в горизонтальной плоскости. Спектр передаточной функции пролётных строений в горизонтальной плоскости практически соответствует спектру передаточной функции вертикальных колебаний [2]. При этом эпюры смещений на резонансных частотах поперечных колебаний можно соотнести с эпюрами деформационных форм (производная по координате эпюр вертикальных форм собственных колебаний) [4]. В результате проведённого анализа спектральных характеристик поперечных горизонтальных колебаний верховой сплотки моста собственных частот колебаний, соответствующих модели колебаний однопролётной или модели колебаний четырёхпролётной балки, выделить не удалось. Следует отметить, что наблюдаются резонансные колебания отдельных пролётов моста. Вероятной причиной может являться то, что в период обследования пролётные строения на трёх опорах

были установлены на временные клетки из металлических пакетов и бетонных блоков со значительным отклонением от проектного положения по высоте.

Продольные колебания пролётных строений моста. Карты комплексного спектра передаточной функции и эпюры смещений пролётных строений вдоль оси моста на резонансных частотах продольных колебаний приведены на рис. 3. Спектр передаточной функции соответствует спектру продольных колебаний однопролётной балки на опорах (см. рис. 3, а).

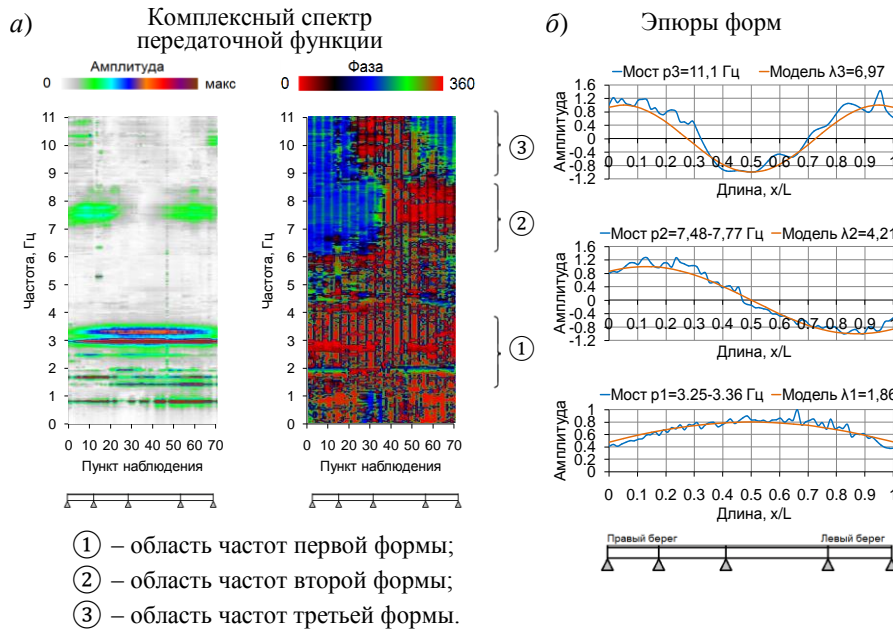


Рис. 3. Диаграммы (продольные колебания, мост через р. Туру):
 а – карты амплитуд и фаз комплексного спектра передаточной функции; б – эпюры продольных смещений пролётных строений и модели на частотах собственных колебаний

Предварительно установлено, что условиям пространственно-временного резонанса [3, 4] удовлетворяют колебания в частотных диапазонах 3,25–3,36, 7,48–7,77 и 11,1–12,2 Гц. Спектральные пики характеризуются не однозначностью центральных частот, в указанных диапазонах наблюдаются до трёх локальных спектральных пиков. Характерной особенностью колебаний пролётных строений моста являются ярко выраженные по амплитуде колебания на частоте 2,95 Гц, которые соответствуют колебаниям одномассового осциллятора (колебания в пунктах наблюдения происходят в одной фазе и практически с одинаковой амплитудой). Природа данных колебаний не определена.

На рис. 3, б видно, что эпюры продольных перемещений на резонансных частотах колебаний пролётных строений практически симметричны относительно центра моста. Поэтому идентификация форм собственных колебаний пролётных строений проведена в рамках модели продольных колебаний однопролётной прямолинейной балки равного сечения и жёсткости, с равномерно распределённой массой по длине балки, концы которой соединены с неподвижными опорами пружинами одинаковой жёсткости (без учёта податливости опор).

Частотное уравнение и выражение эпюр форм собственных колебаний модели определяются формулами [7]:

$$(\eta^2 - \lambda_j^2)\sin(\lambda_j) + 2\eta\lambda_j\cos(\lambda_j) = 0, \quad (7)$$

$$Y_j(\xi) = Y_{0j} \left[\cos(\lambda_j \xi) + \frac{\eta}{\lambda_j} \sin(\lambda_j \xi) \right], \quad (8)$$

где λ_j – корни частотного уравнения (7); $\eta = \frac{kL}{EF}$ – безразмерный коэффициент упругой заделки в опорном сечении продольным перемещениям; k – жёсткость пружин на концах балки, тс/м; EF – жёсткость поперечного сечения относительно деформаций сжатия–растяжения, тс; L – длина балки (моста), м; $\xi = \frac{x}{L}$ – безразмерная координата.

В результате вариации коэффициента η было установлено, что наилучшее совпадение частот и эпюр форм собственных продольных колебаний пролётных строений и модели достигается при $\eta \approx 4,0$. Однако, количество и точность измерения частот собственных продольных колебаний пролётных строений моста не позволяют оценить податливость опор вдоль продольной оси моста. Поэтому для оценки упругих характеристик использована модель колебаний балки без учёта податливости опор, в рамках которой проведена идентификация форм собственных колебаний пролётных строений. Результаты решения обратной спектральной задачи в указанной модели приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты аппроксимации частот спектра собственных продольных колебаний пролётных строений моста через р. Туру

Частота, Гц		λ_j	Упругие характеристики	Диаграммы изменения ошибки аппроксимации от коэффициента η
Мост	Модель, $p_j = \sqrt{a\lambda_j^2}$			
3,25÷3,36	$p_1 \approx 3,44$	2,1537	$a = \frac{EF}{4\pi^2 mL^2} \approx 2,5528, 1/c^2$ $EF \approx 1,74 \cdot 10^7, \text{ тс}$ $k = 1,95 \cdot 10^5 \text{ тс/м}, \eta = 4.$	
7,48÷7,77	$p_2 \approx 7,31$	4,5778		
11,1 ÷ 12,2	$p_3 \approx 11,64$	7,2872		

Обозначения: $a = \frac{EF}{4\pi^2 L^2 m} 1/c^2$; $m = 1,356 \text{ тс} \cdot c^2/m^2$, $L = 357 \text{ м}$ – погонная масса и длина неразрезного четырёхпролётного строения, соответственно; k – жёсткость пружин на концах балки, тс/м.

Значение частоты первой формы модели больше, чем значение первой частоты пролётных строений, поэтому значение жёсткости поперечного сечения пролётных строений сжатию-растяжению несколько завышено. Диапазоны частот собственных форм колебаний пролётных строений определяют диапазон искомых динамических параметров модели. Разли-

чие собственных частот пролётных строений и модели в среднем составляет 4,2 %, что превышает установленное максимальное значение. При этом точность определения упругих характеристик пролётных строений составляет порядка 8,4 %. Поэтому в случае организации сейсмометрического мониторинга технического состояния конструкций моста требуется уточнение модели, которое должно производиться путём проведения детального инженерно-сейсмометрического обследования, посредством измерения большего количества частот собственных колебаний пролётных строений мостового сооружения, введенного в эксплуатацию, с более высокой точностью.

Автодорожный мост через протоку Байбалаковскую, 17 км дороги Ханты-Мансийск – Нягань

Мост выполнен в виде балочной неразрезной системы с ездой поверху. В продольном направлении неразрезное пролётное строение моста выполнено по схеме 42,0+4×63,0+42,0 м.

Поперечные колебания пролётных строений моста в горизонтальной плоскости. Спектр передаточной функции поперечных колебаний пролётных строений в горизонтальной плоскости приведен на рис. 4. Он соответствует спектру поперечных колебаний однопролётной балки.

Эпюры поперечных смещений пролётных строений моста в горизонтальной плоскости на резонансных частотах приведены на рис. 5.

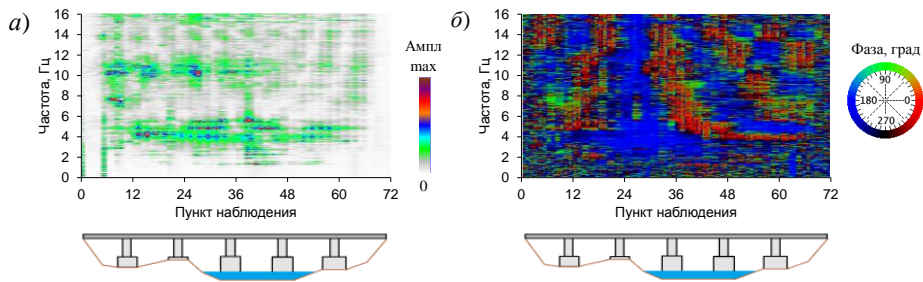


Рис. 4. Спектр передаточной функции поперечных колебаний пролётных строений (мост через протоку Байбалаковскую):
а – амплитудный спектр; б – фазовый спектр

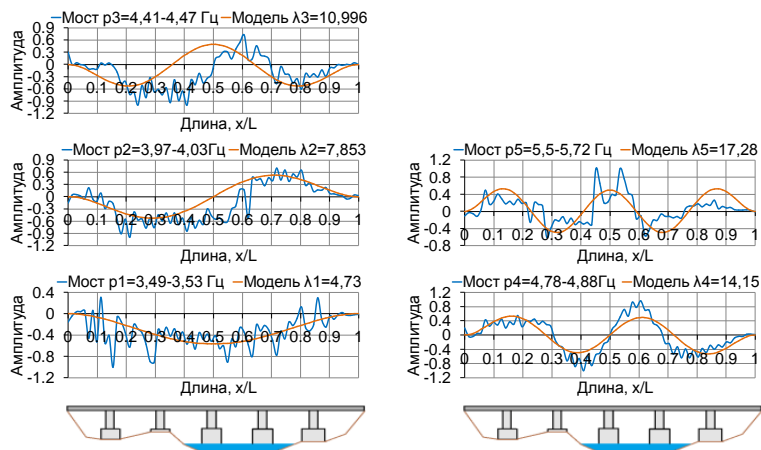


Рис. 5. Эпюры поперечных смещений пролётных строений и модели (мост через протоку Байбалаковскую)

Идентификация форм собственных колебаний пролётных строений осуществлена в рамках модели изгибных колебаний однопролётной балки, жёстко закреплённой в опорных сечениях, относительно угловых и поперечных перемещений.

Заметное отличие эпюр форм собственных колебаний пролётных строений от эпюр форм собственных колебаний модели связано с локальным влиянием опор на поперечные перемещения пролётных строений. Оценка упругих характеристик пролётных строений проведена в рамках модели изгибных колебаний однопролётной балки, в опорных сечениях упруго опертой относительно угловых и жёстко относительно поперечных смещений. Влияние опор на поперечные перемещения пролётных строений учитывалось как отпорность условного упругого полупространства. При условии равенства коэффициентов жёсткости относительно угловых перемещений в опорных сечениях $\mu_1 = \mu_2 = \mu$ частотное уравнение и выражение эпюр форм собственных колебаний модели определяются формулами [7]

$$2\lambda_j^2 sh(\lambda_j) sin(\lambda_j) + 2\mu\lambda_j [ch(\lambda_j) sin(\lambda_j) - sh(\lambda_j) cos(\lambda_j)] + \mu^2 [1 - ch(\lambda_j) cos(\lambda_j)] = 0, \quad (9)$$

$$Y_j(\xi) = Y_{0j} \left\{ V(\lambda_j \xi) - \frac{V(\lambda_j)}{\lambda_j T(\lambda_j) + \mu U(\lambda_j)} \lambda_j T(\lambda_j \xi) + \mu U(\lambda_j \xi) \right\}, \quad (10)$$

где λ_j – корни частотного уравнения (9); $S(\lambda_j \xi)$, $T(\lambda_j \xi)$, $U(\lambda_j \xi)$, $V(\lambda_j \xi)$ – функции Крылова; $\lambda_j^4 L^4 = \frac{m\omega_j^2}{EI}$; ω_j – j -я частота собственных форм колебаний, рад/с; $\xi = \frac{x}{L}$ – безразмерная координата; L – длина балки (моста), м; EI – жёсткость сечения балки простому изгибу, тс·м²; $\mu = \frac{K_\phi L}{EI}$ – безразмерный коэффициент жёсткости опор угловым перемещениям; K_ϕ – жёсткость угловым перемещениям в опорном сечении, тс·м; m – погонная масса, тс·с²/м².

Минимальное значение ошибки аппроксимации достигается при условии жёсткого закрепления балки модели в опорных сечениях ($\mu = \infty$). Результаты аппроксимации спектра собственных частот пролётных строений моста, спектром собственных частот модели приведены в табл. 4. Различие собственных частот пролётных строений и модели в среднем составляет 3,8 % (максимальное значение 9 %), что превышает установленное максимальное значение погрешности измерения частот. Поэтому точность определения упругих характеристик пролётных строений составляет более 7,6 %. В случае организации сейсмометрического мониторинга технического состояния моста модель требует уточнения.

Значительное отличие значений частот первой формы собственных колебаний модели и пролётных строений указывает на то, что полученное значение EI завышено. Согласно [2], среднее значение жёсткости поперечного сечения пролётных строений моста простому изгибу в вертикальном направлении составляет $EI \approx 5,53 \cdot 10^6$ тс·м².

Аппроксимация с требуемой степенью точности достигается только в рамках сложной модели, учитывающей инерцию поворота поперечного сечения балки, что затрудняет проведение оперативной оценки жёсткости поперечного сечения пролётных строений простому изгибу.

Таблица 4

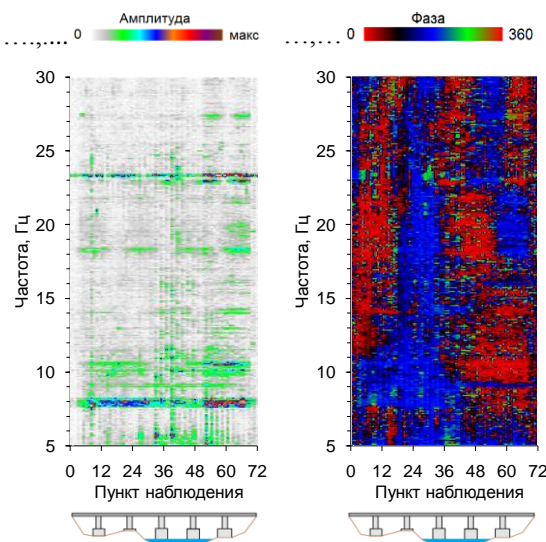
Результаты аппроксимации частот спектра собственных поперечных колебаний пролётных строений моста через протоку Байбалаковская

Частота, Гц		λ_j	Упругие характеристики
Мост	Модель, $p_j = \sqrt{a\lambda_j^4 + b}$		
3,49÷3,53	$p_1 \approx 3,8560$	4,730041	$a = \frac{EI}{4\pi^2 mL^4} \approx 0,000209, 1/c^2$ $b = \frac{k_{sh\parallel}}{4\pi^2 m} \approx 14,76, 1/c^2$ $EI \approx 8,84 \cdot 10^7, \text{ тс} \cdot \text{м}^2$ $k_{sh\parallel} = 490, \text{ тс}/\text{м}^2$
3,97÷4,03	$p_2 \approx 3,9445$	7,853205	
4,41÷4,47	$p_3 \approx 4,2213$	10,99561	
4,78÷4,88	$p_4 \approx 4,8076$	14,13716	
5,5÷5,72	$p_5 \approx 5,7788$	17,27876	

Обозначения: $m = 0,841 \text{ тс} \cdot \text{с}^2/\text{м}^2$, $L = 336 \text{ м}$ – погонная масса и длина неразрезного шестипролётного строения, соответственно;
 $k_{sh\parallel}$ – отпорность на погонный метр длины балки условного упругого полупространства поперечному сдвигу поперёк оси моста, $\text{тс}/\text{м}^2$.

Продольные колебания пролётных строений моста. Карты комплексного спектра передаточной функции и эпюры смещений пролётных строений вдоль оси моста на резонансных частотах продольных колебаний приведены на рис. 6.

а) Комплексный спектр передаточной функции



б) Эпюры форм

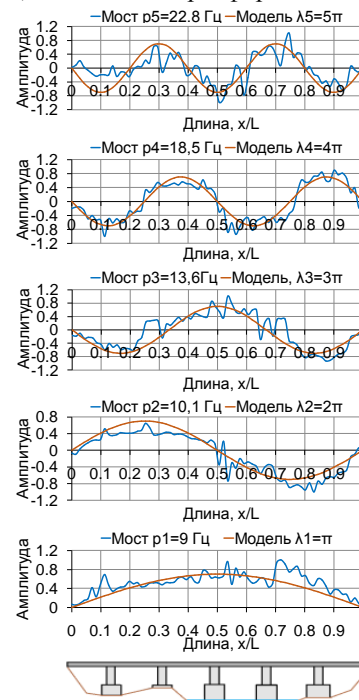


Рис. 6. Диаграммы (продольные колебания, мост через протоку Байбалаковскую):
 а – карты амплитуд и фаз комплексного спектра передаточной функции; б – эпюры продольных смещений пролётных строений и модели на частотах собственных колебаний

Спектр передаточной функции соответствует спектру продольных колебаний однопролётной балки. Идентификация эпюр смещений балки жёсткости моста на резонансных частотах продольных колебаний произведена с использованием модели продольных колебаний однопролётной балки, жёстко закреплённой в опорных сечениях. Характерной особенностью продольных колебаний пролётных строений на частоте 9 Гц является крайне малая ширина спектрального пика по отношению к ширине спектральных пиков на других частотах собственных колебаний, а также незначительное отличие от частоты второй формы (10,1), которое составляет только 1,1 Гц.

В первом приближении оценка упругих характеристик пролётного строения в продольном направлении произведена в рамках модели продольных колебаний однопролётной балки, упруго закреплённой в опорных сечениях, относительно продольных смещений.

В случае одинакового упругого закрепления однопролётной балки в опорных сечениях частотное уравнение и выражение эпюр форм собственных колебаний модели определяются формулами (7) и (8). Результаты решения обратной спектральной задачи в рамках модели приведены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты аппроксимации частот спектра собственных продольных колебаний пролётных строений моста через протоку Байбалаковскую

Частота, Гц		λ_j	Упругие характеристики
Мост	Модель, $p_j = \sqrt{a\lambda_j^2}$		
– ? –	$p_1 \approx 4,583$	2,753	$a = \frac{EF}{4\pi^2 mL^2} \approx 2,771, 1/c^2$ $EF \approx 1,1 \cdot 10^7, \text{ тс}$ $\eta_1 = \eta_2 = \eta = \frac{kL}{EF} = 14$ $k = \frac{\eta EF}{L} = 4,46 \cdot 10^5 \text{ тс/м}$
10,1	$p_2 \approx 9,207$	5,531	
13,6	$p_3 \approx 13,899$	8,349	
18,5	$p_4 \approx 18,671$	11,216	
22,8	$p_5 \approx 23,519$	14,128	
29,0	$p_6 \approx 28,436$	17,081	

Обозначения: $a = \frac{EF}{4\pi^2 L^2 m} 1/c^2$; $m = 0,841 \text{ тс} \cdot \text{с}^2/\text{м}^2$, $L = 336 \text{ м}$ – погонная масса и длина неразрезного шестипролётного строения соответственно; k – жёсткость пружин на концах балки, тс/м; η – безразмерный коэффициент упругой заделки балки в опорном сечении продольным перемещениям.

Различие собственных частот пролётных строений и модели в среднем составляет 3,2% (максимальное значение 8,8%), поэтому точность определения упругих характеристик пролётных строений составляет более 6,4%. В случае организации сейсмометрического мониторинга технического состояния моста модель требует уточнения.

Значение первой частоты продольных колебаний пролётных строений, определённое в результате идентификации, равно 9 Гц, что противоречит решению обратной спектральной задачи. Учитывая, что колебания пролётных строений на частоте 9 Гц имеют аномальные характеристики, вероятнее всего, данные колебания представляют собой вторую гармонику первой формы колебаний, однако на частоте 4,5 Гц колебания соответствуют шумовым, эпюра смещения не идентифицируется.

Точечное неравномерное сопротивление опор продольным смещениям приводит к искажению как эпюр форм собственных колебаний, так и смещению центральных частот спектральных пиков. В данном случае адекватность модели можно подтвердить только сравнением скоростей распространения упругих продольных волн вдоль пролётных строений и вдоль балки модели.

На рис. 7 приведены дисперсионная кривая модели и годограф синтетических сейсмограмм распространения импульса с поляризацией поперёк потока вдоль продольной оси пролётных строений моста. Значение скорости распространения продольных волн вдоль балки модели, согласно дисперсионной кривой (см. рис. 7, а), составляет $V_p = \frac{d\omega}{dk} \approx 3590$ м/с, что примерно соответствует значению скорости, которое определено по углу наклона ветвей годографа (см. рис. 7, б). Поэтому можно считать, что модель адекватно и достаточно точно отражает динамическую работу пролётных строений моста.

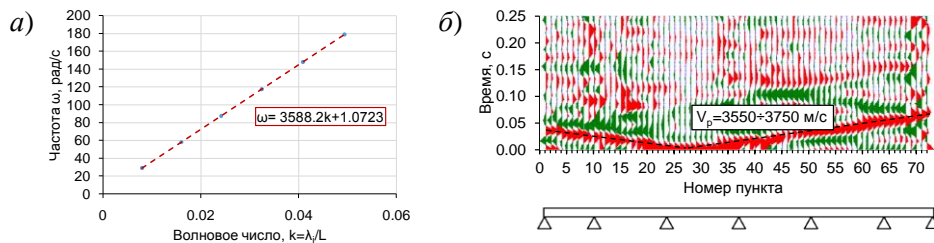


Рис. 7. Диаграммы:

а – дисперсионная кривая модели; б – годограф синтетических сейсмограмм распространения импульса с поляризацией поперёк потока

4. Югорский вантовый мост через р. Обь в районе г. Сургута

Автодорожный вантовый мост состоит из вантовой конструкции, со сталежелезобетонным неразрезным пролётным строением (балки жёсткости) длиной $148+408=556$ м, к которой примыкает балочный участок моста.

Поперечные колебания балки жёсткости моста в горизонтальной плоскости. Комплексный спектр передаточной функции поперечных колебаний балки жёсткости моста, в горизонтальной плоскости приведен на рис. 8.

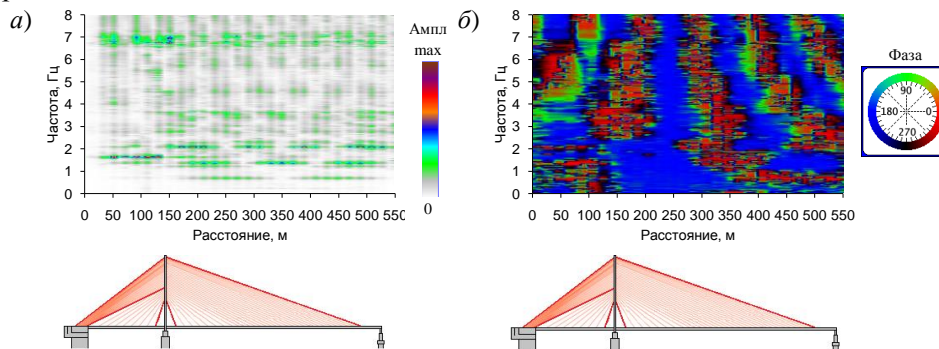


Рис. 8. Спектр передаточной функции поперечных горизонтальных колебаний балки жёсткости вантового сооружения (мост через р. Обь): а – амплитудный спектр; б – фазовый спектр

Спектр эпюр форм поперечных горизонтальных колебаний балки жёсткости приведён на рис. 9.

Амплитудный спектр поперечных горизонтальных колебаний балки жёсткости можно разделить на два спектра: низкочастотный и высокочастотный. Первый – низкочастотный – соответствует формам собственных изгибных колебаний двухпролётной балки на жёстких опорах (3 частоты, см. рис. 9, а), второй – высокочастотный – соответствует формам собственных изгибных колебаний однопролётной балки на упругих опорах (4 частоты, см. рис. 9, б). Следует отметить, что для вертикальной компоненты наблюдается аналогичный эффект разделения спектра изгибных колебаний на два спектра: низкочастотный и высокочастотный [2].

В отличие от низкочастотного спектра, для высокочастотного характерно несовпадение положения опоры «1» и узлов форм собственных колебаний балки жёсткости, вантового сооружения. Причем амплитуды смещений колебаний низкочастотного спектра превышают амплитуды смещений на частотах высокочастотного спектра в 5–10 раз. Амплитуды форм собственных колебаний балки жёсткости вантового сооружения на рис. 9 нормированы на максимальные значения каждой формы.

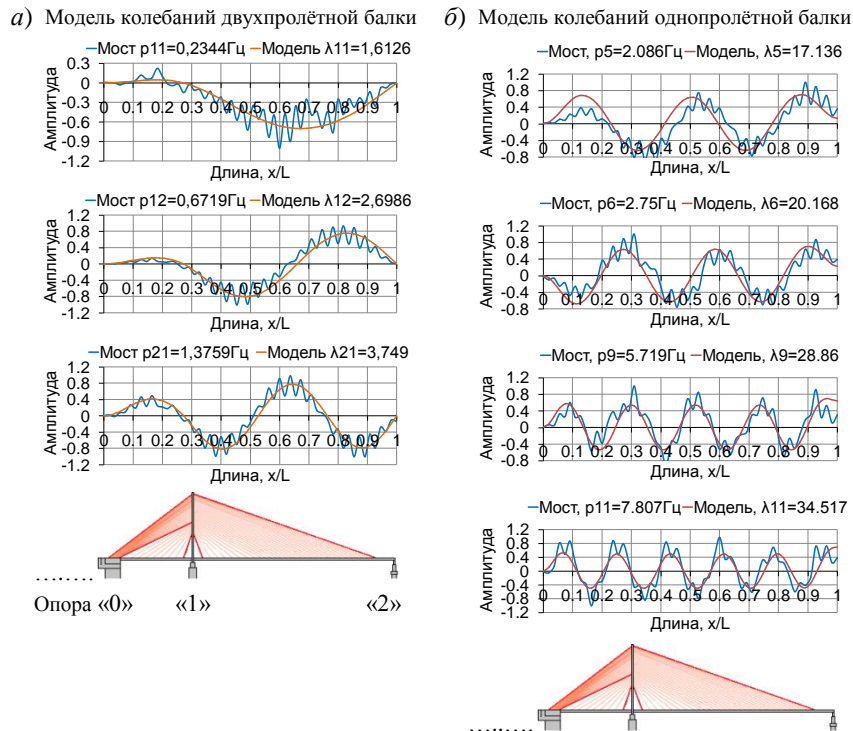


Рис. 9. Эпюры форм собственных поперечных колебаний балки жёсткости вантового сооружения в горизонтальной плоскости (мост через р. Обь): а – модель двухпролётной балки; б – модель однопролётной балки

Параметры регистрации колебаний при проведении обследования обеспечивали точность измерения частот (спектральное разрешение) не более 0,015 Гц. В данном случае точности измерения частот недостаточно, так как осреднённое по всем пунктам наблюдения значение наинижайшей

частоты собственных колебаний составляет всего 0,2344 Гц. Увеличение длины преобразования Фурье с 4К до максимально возможного значения 8К для использованной длительности сеанса регистрации колебаний позволили увеличить точность измерения в два раза, но и в этом случае ошибка измерения частот составляет порядка 6,4%.

Оценка жёсткости поперечного сечения балки жёсткости по низкочастотному спектру собственных частот колебаний. Оценка жёсткости поперечного сечения простому изгибу балки жёсткости вантового сооружения проведена в рамках модели изгибных колебаний двухпролётной прямолинейной балки равного сечения и постоянной погонной массы, жёстко закреплённой в опорных сечениях «0» и «2» и шарнирно на опоре «1». Данная модель обеспечивает наилучшее совпадение частот и эпюр форм собственных поперечных изгибных колебаний балки жёсткости и модели.

Результаты оценки жёсткости поперечного сечения балки жёсткости вантового пролёта простому изгибу в рамках указанной модели приведены в табл. 6.

Таблица 6

Результаты аппроксимации частот спектра собственных поперечных колебаний балки жёсткости вантового сооружения моста через р. Обь (модель двухпролётной балки)

Частота, Гц		λ_j ($L_1 = 148$ м)	Упругие характеристики
Мост	Модель, $p_j = \sqrt{a\lambda_j^4}$		
0,2344	$p_1 \approx 0,2344$	1,612567	$a = \frac{EI}{4\pi^2 m L_1^4} \approx 0,0081254, 1/c^2$ $EI = \frac{4\pi^2 L_1^4 p_{1,1}^2 m}{\lambda_{1,1,1}^4} \approx 1,63 \cdot 10^8, [тс \cdot м^2]$
0,6719	$p_2 \approx 0,6563$	2,698614	
1,3759	$p_3 \approx 1,268$	3,749024	

Обозначения: $m = 1,06$ тс·с²/м², $L = 556$ м – погонная масса и длина балки жёсткости вантового сооружения соответственно; $err \approx 0,057$ Гц; j – сквозной индекс частот.

Значения второй и третьей частот модели меньше, чем значения собственных частот балки жёсткости, что связано с тем, что существуют неустановленные условия работы балки жёсткости, например, отличная от нуля жёсткость угловым и поперечным перемещениям балки жёсткости на опоре «1» или влияние вант.

Оценка жёсткости поперечного сечения балки жёсткости по высокочастотному спектру частот собственных колебаний. Наилучшее совпадение частот и эпюр форм собственных колебаний пролётных строений в области высокочастотного спектра достигается для модели колебаний однопролётной балки, жёстко закреплённой относительно поперечных и угловых перемещений в левом опорном сечении (устой, опора «0») и упруго закреплённой относительно поперечных и жёстко – относительно угловых перемещений в правом опорном сечении (опора примыкания балочной части моста «2»). Влияние вант на поперечные перемещения балки жёсткости учитывалось как влияние условного упругого полупространства.

Частотное уравнение и выражение эпюр форм собственных колебаний в рамках модели однопролётной балки определяются формулами [7]:

$$[\lambda_j^3 S(\lambda_j) - \eta V(\lambda_j)]T(\lambda_j) - [\lambda_j^3 V(\lambda_j) - \eta U(\lambda_j)]U(\lambda_j) = 0, \quad (11)$$

$$Y_j(\lambda_j \xi) = U_j(\lambda_j \xi) - \frac{T(\lambda_j)}{U(\lambda_j)} V_j(\lambda_j \xi), \quad (12)$$

где λ_j – корни частотного уравнения (11); $S(\lambda_j \xi)$, $T(\lambda_j \xi)$, $U(\lambda_j \xi)$, $V(\lambda_j \xi)$ – функции Крылова; $\lambda_j^4 L^4 = \frac{m\omega_j^2}{EI}$; ω_j – j -я частота собственных форм колебаний, рад/с; $\xi = \frac{x}{L}$ – безразмерная координата; L – длина балки (моста), м; EI – жёсткость сечения балки простому изгибу, тс·м²; $\eta = \frac{K_{sh}L^3}{EI}$ – безразмерный коэффициент жёсткости опоры поперечным перемещениям; K_{sh} – жёсткость опоры поперечным перемещениям, тс/м; m – погонная масса, тс·с²/м².

Результаты оценки жёсткости поперечного сечения балки жёсткости вантового пролёта простому изгибу в рамках модели колебаний однопролётной балки приведены в табл. 7.

Таблица 7

Результаты аппроксимации частот спектра собственных поперечных колебаний балки жёсткости вантового сооружения моста через р. Обь (модель однопролётной балки)

Частота, Гц		λ_j	Упругие характеристики
Мост	Модель, $p_j = \sqrt{a\lambda_j^4 + b}$		
2,086	$p_5 \approx 2,1068$	17,1358	$a = \frac{EI}{4\pi^2 mL^4} \approx 0,00004312, 1/c^2$ $b = \frac{k_{sh\parallel}}{4\pi^2 m} \approx 0,72, 1/c^2; \eta = \frac{K_{sh}L^3}{EI} \approx 4 \cdot 10^4.$ $EI = \frac{4\pi^2 L_1^4 p_{11}^2 m}{\lambda_{L1,1,1}^4} \approx 1,72 \cdot 10^8, \text{ тс} \cdot \text{м}^2$ $k_{sh\parallel} = 4\pi^2 mb = 30,16, \text{ тс}/\text{м}^2$ $K_{sh} = \frac{\eta EI}{L^3} \approx 40028 \text{ тс}/\text{м}$
2,7496	$p_6 \approx 2,8025$	20,168	
5,7192	$p_9 \approx 5,5346$	28,86	
7,807	$p_{11} \approx 7,8692$	34,517	

Обозначения: $m = 1,06 \text{ тс} \cdot \text{с}^2/\text{м}^2$, $L = 556 \text{ м}$ – погонная масса и длина балки жёсткости вантового сооружения, соответственно; $k_{sh\parallel}$ – отпорность вант; η – безразмерный коэффициент жёсткости опоры поперечному сдвигу; K_{sh} – жёсткость опоры поперечному сдвигу, тс/м; $err \approx 0,1 \text{ Гц}$.

Параметр η является плохо определённым параметром, ошибка измерения параметра составляет не менее 20 %.

Различие собственных частот пролётных строений и модели в среднем составляет 1,75 % (максимальное значение 3,3 %), поэтому точность определения упругих характеристик пролётных строений составляет примерно 3,5 %. В случае организации сейсмометрического мониторинга технического состояния моста может потребоваться уточнение модели.

Значения жёсткости поперечного сечения балки жёсткости простому изгибу, определённые двумя способами (в области низкочастотного и вы-

сокочастотного спектров), практически совпадают, поэтому можно утверждать, что установленные модели адекватно отражают динамику балки жёсткости.

Продольные колебания балки жёсткости моста. Комплексный спектр передаточной функции продольных колебаний балки жёсткости вантового сооружения приведен на рис. 10. Спектр передаточной функции соответствует спектру продольных колебаний однопролётной балки.

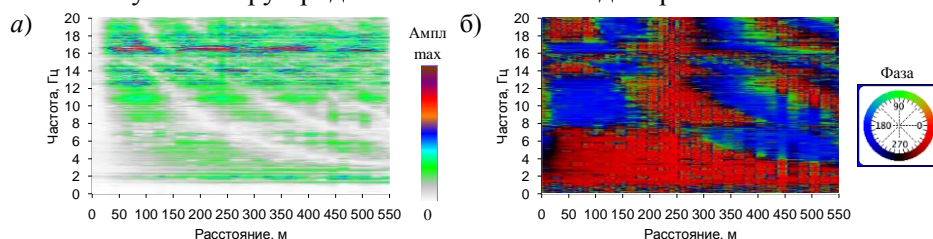


Рис. 10. Спектр передаточной функции продольных колебаний балки жёсткости вантового сооружения (мост через р. Обь): а – амплитудный спектр; б – фазовый спектр

Амплитудный спектр резонансных продольных колебаний балки жёсткости характеризуется неоднозначными частотами колебаний, эпюры которых соответствуют одной форме собственных колебаний модели (табл. 8).

Таблица 8

Частоты резонансных продольных колебаний балки жёсткости вантового сооружения, соответствующие частотам форм собственных колебаний модели

Форма	1-я форма			2-я форма		3-я форма		4-я форма	
Номер	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Частота p_i , Гц	2,334	2,735	3,467	5,85	6,17	8,375	8,90	10,82	11,85

Вероятной причиной неоднозначности частот собственных форм продольных колебаний балки жёсткости является то, что балка жёсткости и пилон вантового сооружения образуют систему из двух связанных осцилляторов, которая характеризуется раздвоением спектральных пиков, соответствующих собственным колебаниям как балки жёсткости, так и пилона.

Идентификация форм собственных продольных колебаний балки жёсткости произведена в рамках модели продольных колебаний однопролётной балки, жёстко закреплённой в левом опорном сечении и соединённой пружиной жёсткостью k с неподвижной опорой в правом опорном сечении ($k_1 = \infty, k_2 = k$). Частотное уравнение и выражение эпюр форм собственных колебаний модели определяются формулами (4) и (5).

Эпюры форм продольных перемещений балки жёсткости на резонансных частотах, наиболее точно соответствующие спектру частот и эпюрам форм собственных колебаний модели, приведены на рис. 11.

Результаты аппроксимации спектра частот собственных продольных колебаний балки жёсткости вантового сооружения спектром частот собственных колебаний модели приведены в табл. 9.

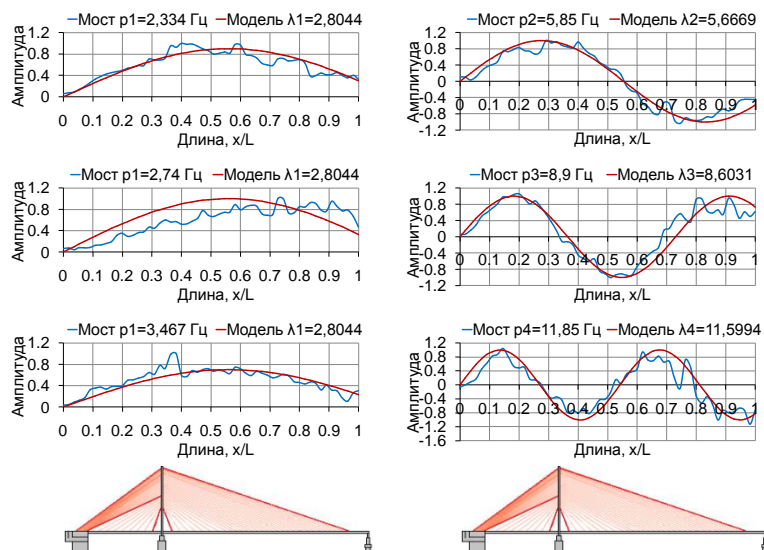


Рис. 11. Эпюры продольных смещений балки жёсткости вантового пролёта и модели

Таблица 9

Результаты аппроксимации частот спектра собственных продольных колебаний балки жёсткости вантового сооружения

Частота, Гц		λ_j	Упругие характеристики	Диаграммы изменения ошибки аппроксимации от коэффициента η
Мост	Модель, $p_j = \sqrt{a\lambda_j^2}$			
2,735	$p_1 \approx 2,874$	2,8044	$a = \frac{EF}{4\pi^2 mL^2} \approx 1,0503, 1/c^2$ $EF \approx 1,36 \cdot 10^7, \text{ тс}$ $\eta = 8$ $\eta = \frac{kL}{EF} = 1,95 \cdot 10^5 \text{ тс/м}$	
5,85	$p_2 \approx 5,805$	5,6669		
8,9	$p_3 \approx 8,817$	8,6031		
11,85	$p_4 \approx 11,887$	11,599		

Обозначения: $a = \frac{EF}{4\pi^2 L^2 m} 1/c^2$; $m = 1,06 \text{ тс} \cdot \text{с}^2/\text{м}^2$, $L = 556 \text{ м}$ – погонная масса и длина неразрезного четырёхпролётного строения, соответственно; k – жёсткость пружины на концах балки, тс/м.

Различие собственных частот пролётных строений и модели в среднем составляет 1,72 % (максимальное значение 4,8%), поэтому точность определения упругих характеристик пролётных строений составляет примерно 3,5 %.

Значение погрешности измерения частот форм превышает максимально допустимое значение (3 %), поэтому в случае организации сейсмометрического мониторинга технического состояния вантового сооружения моста, может потребоваться уточнение модели.

Заключение

В результате анализа восьми спектров колебаний в горизонтальной плоскости пролётных строений четырёх мостов различного конструктивного исполнения, проведённого в рамках простых моделей, установлено:

в одном случае собственные колебания пролётных строений в рамках стандартных моделей не установлены (продольные колебания моста через р. Туру), в двух случаях (автодорожный мост через р. Иню) точность моделей удовлетворяет требованиям мониторинга и в пяти случаях модели требуют уточнения (усложнения);

продольные колебания пролётных строений исследованных мостов соответствуют продольным колебаниям однопролётной балки, упруго закреплённой в опорных сечениях, влияние опор можно рассматривать как отпорность условного упругого полупространства;

поперечные колебания пролётных строений мостов, кроме балок жёсткости вантовых сооружений, также соответствуют поперечным изгибным колебаниям однопролётной балки, упруго закреплённой в опорных сечениях, влияние опор также можно рассматривать как отпорность условного упругого полупространства;

поперечные колебания вантового сооружения на частотах первых форм собственных колебаний, наиболее ярко выраженных по амплитуде, соответствуют колебаниям двухпролётной балки, высшие формы, слабо выраженные по амплитуде, соответствуют формам однопролётной балки жёсткости (оценки жёсткости по двум рядам частот практически совпадают);

точечное неравномерное сопротивление опор искажает эпюры форм и является причиной смещения частот форм собственных колебаний;

на амплитудных спектрах колебаний пролётных строений фиксируются спектральные пики, центральные частоты которых соответствуют частотам деформационных форм, собственным частотам колебаний отдельных конструкций, связанных колебаний, пространственных и временных гармоник, комбинационных и т. д.

Насыщенность спектра колебаний пролётных строений спектральными пиками определяется конструктивным исполнением мостового сооружения и техническим состоянием на момент обследования, поэтому объём исследований динамической работы мостов и ожидаемый объём полезной информации носит неопределённый характер.

Получаемые упругие параметры могут использоваться как для подтверждения достоверности данных, полученных при обработке вертикальных колебаний, так и в качестве самостоятельных параметров мониторинга технического состояния мостового сооружения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кузьменко А.П., Сабуров В.С. Сравнение результатов динамических и статических испытаний двухпролётной балочной конструкции // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2023. Т. 308. С. 42-51.

2. Кузьменко А.П., Сабуров В.С. Аналитические модели вертикальных колебаний пролётных строений мостовых сооружений // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2023. Т. 309. С. 3-20.

3. **Сабуров В.С., Кузьменко А.П.** Обследование зданий повышенной этажности. Инженерно-сейсмометрический метод. LAMBERT Academic Publishing, 2013. 175 с.
4. **Кузьменко А.П., Сабуров В.С.** Обследование плотин гидроэлектростанций. Инженерно-сейсмометрический метод (часть 1). [Электронный ресурс]: Монография, ИВТ СО РАН, Новосибирск, 2017. 206 с.
5. **Гуськов А.Е., Сабуров В.С., Кузьменко А.П.** Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2007613742, «ГЕОТОН-А», Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – 03.09.2007.
6. **Кузьменко А.П., Сабуров В.С., Лучшев И.А., Гуськов А.Е.** Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2007611653, «ГЕОТОН-Т», Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – 19.04.2007.
7. **Сабуров В.С., Кузьменко А.П.** Теория колебаний балки. [Электронный ресурс]: Учебн. пособие по курсу «Динамика строительных конструкций и сооружений». Новосибирск, 2015. 179 с.
8. **Сабуров В.С., Кузьменко А.П.** Частоты и формы собственных колебаний многопролетной балки. [Электронный ресурс]: Учебн. пособие по курсу «Динамика строительных конструкций и сооружений». Новосибирск, 2019. 140 с.
9. **ГОСТ 24026 – 80.** Исследовательские испытания. Планирование эксперимента. Термины и определения.
10. **РДМУ 109 77.** Методические указания. Методика выбора и оптимизации контролируемых параметров технологических процессов.

REFERENCES

1. Kuzmenko A.P., Saburov V.S. Comparison of the results of dynamic and static tests of a two-span beam structure. *Izvestija VNIIG im. B.E. Vedeneeva – Proceedings of the VNIIG*. 2023;308:42-51. (In Russ.).
2. Kuzmenko A.P., Saburov V.S. Analytical models of vertical oscillations of bridge spans. *Izvestija VNIIG im. B.E. Vedeneeva – Proceedings of the VNIIG*. 2023;309:3-20. (In Russ.).
3. Saburov V.S., Kuzmenko A.P. Survey of high-rise buildings. Engineering seismometric method. Saarbrücken: LAMBERT Acad. Publ.; 2013, 175 p. (In Russ.).
4. Kuzmenko A.P., Saburov V.S. Inspection of hydroelectric dams. Engineering seismometric method (Part 1) [Electronic resource]. Novosibirsk: 2017. 206 p. (In Russ.).
5. The certificate of state registration of computer programs No. 2007613742, «GEOTON-A» / A.E. Guskov, V.S. Saburov, A.P. Kuzmenko. Registered in the Register of computer programs 03.09.2007. (In Russ.).
6. The certificate of state registration of computer programs No. 2007611653 «GEOTON-T» / A.P. Kuzmenko, V.S. Saburov, I.A. Bestev, A.E. Guskov. Registered in the Register of computer programs 19.04.2007. (In Russ.).
7. Saburov V.S., Kuzmenko A.P. Theory of beam vibrations: [Electronic resource]. Murom: Educational and Methodological Center of MI VSU; 2015. 179 p. (In Russ.).
8. Kuzmenko A.P., Saburov V.S. Frequencies and forms of natural oscillations of a multi-span beam: [Electronic resource]. Murom: Educational and Methodological Center of MI VSU; 2019. 140 p. (In Russ.).
9. GOST 24026-80. Research tests. Experiment planning. Terms and definitions.
10. RDMU 109-77. Methodical instructions. Methodology of selection and optimization of controlled parameters of technological processes.

Информация об авторах

А.П. Кузьменко – канд. техн. наук, старший научный сотрудник;

В.С. Сабуров – научный сотрудник.

Information about the authors

A.P. Kuzmenko – Cand. Sci. (Techn.), Senior Researcher;

V.S. Saburov – Research Fellow.

Статья поступила в редакцию 27.10.2023; одобрена после рецензирования 15.11.2023; принята к публикации 20.12.2023.

The article was submitted 27.10.2023; approved after reviewing 15.11.2023; accepted for publication 20.12.2023.

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Бакановичус Н.С., Лялина А.А., Максимова А.А., Прокофьев В.А., Пучкарюс А. В., Тесленко Д.Д.</i> Математическое моделирование гидравлических условий на участке р. Вилюй между створами Вилюйских ГЭС-1, 2 и Светлинской ГЭС	3
<i>Климович В.И., Яковлев Р.О.</i> Экспериментальные исследования максимальных придонных скоростей при воздействии струй от винтов судна	17
<i>Дейнеко Л.С. (Василевская), Дейнеко А.В., Антясова Е.А.</i> Оценка состояния гидротехнических сооружений IV класса после многолетней эксплуатации и анализ возможных последствий в результате аварии	33
<i>Сольский С.В., Назукина Ю.Е.</i> Систематизация опасных инженерно-геологических процессов на гидротехнических сооружениях	47
<i>Уразаев М.Н., Царовцева И.М., Беллендир Л.Э.</i> Преимущества водоподготовки методом электромагнитного импульса для решения задач противодействия биообрастанию технологического оборудования ТЭС, АЭС и ГЭС	62
<i>Шляев А.В.</i> Моделирование задач гидродинамики методом решеточных уравнений Больцмана	72
<i>Кузьменко А.П., Сабуров В.С.</i> Аналитические модели колебаний в горизонтальной плоскости пролётных строений мостовых сооружений	78

CONTENT

<i>Bakanovichus N.S., Lyalina A.A., Maksimova A.A., Prokofyev V.A., Puchkaryus A.V., Teslenko D.D.</i> Mathematical modeling of hydraulic conditions on the Vilyuy river section between the Vilyuy HPP-1, 2 and the Svetlinskaya HPP	3
<i>Klimovich V.I., Yakovlev R.O.</i> Experimental studies maximum bottom velocities at influence of jets from he ship's propellers	17
<i>Deineko L.S. (Vasilevskaya), Deineko A.V., Antyasova E.A.</i> Assessment of the condition of class IV hydraulic structures after many years of operation and analysis of possible consequences as a result of an accident	33
<i>Solsky S.V., Nazukina Y.E.</i> Systematization of hazardous engineering-geological processes at hydraulic structures	47
<i>Urazaev M.H., Tsarovtseva I.M., Bellendir L.E.</i> Advantages of water treatment by the electromagnetic pulse method for solving the problems of counteracting biofouling of technological equipment of thermal power plants, nuclear power plants and hydroelectric power plants	62
<i>Shilyaev A.V.</i> Computational fluid dynamics using lattice Boltzmann method	72
<i>Kuzmenko A.P., Saburov V.S.</i> Analytical models of fluctuations in the horizontal plane of superstructures bridge structures	78

**Перечень организаций, представивших статьи
для опубликования в сборнике научных трудов
«Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», т. 310**

АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», Санкт-Петербург, Россия;

БКП АО «Трансинжстрой», Москва, Россия;

Группа Компаний «АРКОН ТЕХНОЛОГИЯ», Москва, Россия;

ООО «МНИПИИТИ», ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева,
Москва, Россия;

ООО «Сигма Тау», Москва, Россия;

Федеральный исследовательский центр информационных
и вычислительных технологий (ФИЦ ИВТ), Новосибирск, Россия.

ТРЕБОВАНИЯ К СТАТЬЯМ, ПРЕДСТАВЛЯЕМЫМ
ДЛЯ ОПУБЛИКОВАНИЯ В СБОРНИКЕ НАУЧНЫХ ТРУДОВ
«ИЗВЕСТИЯ ВНИИГ им. Б.Е. ВЕДЕНЕЕВА»

Редакционной коллегией принимаются к публикации открытые для печати оригинальные статьи, нигде ранее не публиковавшиеся и не предназначенные для публикации в другом издании.

Статьи должны включать следующие основные элементы:

формулировка целей статьи (постановка задачи);

краткий анализ современных достижений по рассматриваемому вопросу;

изложение основного материала с анализом полученных результатов;

выводы, рекомендации для дальнейшего использования полученных результатов исследований.

Автор (авторы) предоставляют **Справку** (с подписями) о передаче прав издательству АО «ВНИИГ имени Б.Е. Веденеева» на опубликование статьи в сборнике «Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» и с подтверждением, что статья ранее не публиковалась и не представлена для опубликования в другие издания, а также согласие на обработку персональных данных.

Специалисты из **сторонних организаций** сопровождают статью рекомендательным письмом от организации и **экспертным заключением** о возможности открытого опубликования.

Необходимо предоставить полные сведения о каждом авторе статьи: имя, отчество, фамилию полностью на русском языке и в транслитерированной форме на латинице; наименование организации, где работает или учится автор, и город, в котором она расположена; должность и ученая степень (при наличии); электронный адрес; открытый идентификатор ученого (ORCID) при наличии.

Если у статьи несколько авторов, указывается автор, ответственный за переписку (и в статье не приводятся электронные адреса других авторов). Имена всех авторов при публикации приводятся в принятой ими последовательности.

Заголовок статьи должен отражать ее содержание и быть по возможности кратким – не более 7–9 слов (не считая предлоги и союзы).

Статья должна сопровождаться краткой *аннотацией* объемом не более 250 слов, содержащей основные результаты исследования, и перечнем *ключевых слов* (не менее 3 и не более 15 слов (словосочетаний) в зависимости от объема текста).

Заголовок статьи, аннотация, ключевые слова должны быть продублированы на *английском языке*.

В начале статьи необходимо указать ее тип: научная, обзорная, дискуссионная и т.д.

Объем статьи не должен быть менее 8 и более 18 страниц формата А4, включая текст, рисунки, таблицы, список литературы (рекомендуемый объем статьи – от 9 000 до 25 000 знаков).

Текст статьи должен быть представлен в электронном виде (формат электронного документа – doc, docx).

Основной текст статьи набирается шрифтом Times New Roman размером 11 пт с абзацным отступом (красная строка) 1 см, с одинарным межстрочным интервалом и выравниванием абзаца по ширине.

Заголовок статьи набирается шрифтом Arial размером 12 пт прописными буквами с выравниванием по центру строки.

Поля устанавливаются следующего размера: верхнее – 3,0 см, нижнее – 4,7 см, внутри и снаружи – 4,2 см.

Формулы следует набирать только в редакторе формул Microsoft Equation или MathType с выравниванием по центру, а их порядковые номера в круглых скобках с выравниванием по правому краю. Русские, греческие буквы набираются прямым шрифтом, латинские – курсивом.

Рисунки цветные и черно-белые. Каждый рисунок представляется в виде отдельного файла. В тексте приводятся ссылки на номера всех рисунков. Размер каждого рисунка не должен превышать 125×220 мм. Формат: TIFF, PSD, JPEG, разрешение для сканированных фотографий – 300 dpi.

Подписи к рисункам набираются шрифтом Times New Roman размером 9 пт с выравниванием по центру, представляются в виде отдельного файла. Подписи к рисункам должны быть продублированы на английском языке.

Таблицы. Текст таблицы набирается шрифтом размером 10 пт. Слово «Таблица» и ее номер набираются курсивом размером 10 пт и располагаются над заголовком таблицы с выравниванием по правому краю. Заголовки к таблицам набираются шрифтом Times New Roman жирным начертанием размером 10 пт с межстрочным интервалом один и выравниванием по центру без точки в конце заголовка.

Список литературы приводится в конце статьи. Порядковый номер ссылки указывается в соответствующей строке текста в квадратных скобках. Источники в библиографическом списке располагаются в порядке их упоминания в статье. В описании указывается: фамилии и инициалы авторов, название книги, статьи, сборника или журнала на русском языке и его перевод на английский язык, город, издательство, год издания, номер журнала, количество страниц.

Материал представляется в издательство по электронной почте.

Статьи направлять в издательство

АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» по адресу:

Россия, 195220, Санкт-Петербург, ул. Гжатская 21, ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева.

Тел: (812) 535-88-56, (812) 493-93-41

E-mail: izvestia@vniig.ru

Научный редактор *В.Б. Глаговский*
Редакторы *Т.М. Бовичева, И.В. Кривошапка*
Компьютерная верстка *Н.Н. Седова*

Подписано к печати 22.12.2023.

Формат 70×108 1/16. Бумага типографская № 1. Печать цифровая.
Печ.л. 6,625. Усл.печ.л. 9,275. Тираж 300 (100). Заказ 41.

Издательство АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева».
Типография ООО «ПК Марка».
195220, Санкт-Петербург, Гжатская ул., 21.