

## Численная модель гидроволновой лаборатории для исследования взаимодействия морских волн с гидротехническими сооружениями\*

И. С. НУДНЕР<sup>1,2</sup>, К. К. СЕМЕНОВ<sup>1,3</sup>, В. В. ЛЕБЕДЕВ<sup>1</sup>, Г. С. ХАКИМЗЯНОВ<sup>4,†</sup>,  
Ю. Н. ЗАХАРОВ<sup>4,5</sup>

<sup>1</sup>“23 Государственный морской проектный институт” — филиал АО “31 ГПИСС”,  
Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Балтийский государственный технический университет “Военмех” им. Д. Ф. Устинова,  
Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия

<sup>4</sup>Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>5</sup>Кемеровский государственный университет, Россия

† Контактный e-mail: khak@ict.nsc.ru

Рассмотрены вопросы, связанные с построением и областью применения численной модели гидроволновой лаборатории как инструмента, позволяющего в некоторых ситуациях отказаться от физического моделирования и заменить его численным, удешевить и ускорить ряд этапов проектных работ в гидротехническом строительстве. Представлены математические модели и численные алгоритмы, которые могут войти в состав численной лаборатории и использоваться для численного моделирования процессов генерации поверхностных волн, их распространения и взаимодействия с прибрежными и морскими сооружениями. Перечислены требования к программному обеспечению численной модели гидроволновой лаборатории, выполнение которых позволит эффективнее использовать этот инструмент инженерами-гидротехниками при проектировании гидротехнических сооружений.

*Ключевые слова:* гидротехническое сооружение, волновой лоток, волновой бассейн, волнопродуктор, физическое моделирование, математическая модель, численный алгоритм.

*Библиографическая ссылка:* Нуднер И.С., Семенов К.К., Лебедев В.В., Хакимзянов Г.С., Захаров Ю.Н. Численная модель гидроволновой лаборатории для исследования взаимодействия морских волн с гидротехническими сооружениями // Вычислительные технологии. 2019. Т. 24, № 1. С. 86–105.  
DOI: 10.25743/ICT.2019.24.1.007.

### Введение

При проектировании гидротехнических сооружений и объектов прибреговой инфраструктуры одним из основных методов подтверждения заявляемых характеристик возводимых сооружений является выполнение физического моделирования (натурного или

---

\*Title translation and abstract in English can be found on page 105.

© ИВТ СО РАН, 2019.

в масштабе) в специальных гидроволновых лабораториях. Эти исследования позволяют установить соответствие гидротехнической конструкции и различных параметров взаимодействия волн с ней предъявляемым требованиям. В случае использования уменьшенных моделей изучаемых сооружений применяют результаты теории подобия. При надлежащем соблюдении всех критериев моделирования либо выборе таких условий моделирования, которые обеспечивают попадание в автомодельную область по тем или иным числам подобия, возникает возможность количественно соотнести результаты, полученные при физическом моделировании, с натурой. На важность и значимость применения физического моделирования в гидротехническом строительстве указывает требование нормативных документов выполнять соответствующие исследования для ответственных сооружений. Получаемые результаты подкрепляют выбор проектного решения и предоставляются вместе с самим проектом для государственной экспертизы.

При проектировании гидротехнических сооружений подчас оказывается затруднительным выбрать лучший вариант конструкции в целом или компоновки составляющих ее частей в частности. Вызвано это рядом причин, среди которых следует указать на невозможность построения адекватного и исчерпывающего математического описания ряда конструктивных элементов сооружений, недостаток априорных сведений о тех или иных характеристиках используемых материалов, отсутствие расчетных формул и инженерных методов для решения конкретной задачи. Отсюда могут быть сомнения в том, что предложенное проектное решение наиболее предпочтительное. Его обоснованием могло бы служить сравнение многих вариантов и выбор лучшего из них.

Вместе с тем использование физического моделирования как инструмента определения наиболее рациональных характеристик и параметров гидротехнических сооружений весьма ограничено в связи с высокой стоимостью и, как правило, большой трудоемкостью соответствующих исследований. По этой причине практически отсутствует возможность прибегнуть к данному виду изучения в ситуациях, когда требуется перебрать существенное количество различных проектных вариантов. Выходом из ситуации является применение численных методов моделирования, которые позволяют выбрать наиболее подходящий вариант. При этом неточности, сопровождающие численное моделирование и связанные с неполнотой математического описания гидротехнических конструкций и неопределенностью значений их характеристик, могут вносить в результаты выбора допустимые на практике искажения. Подобная численная модель должна быть организована так, чтобы ее результаты могли быть соотнесены с результатами физического моделирования.

По сути дела имеет место потребность в численной модели гидроволновой лаборатории, позволяющей отказаться в соответствующих ситуациях от физического моделирования и заменить его численным. В этом случае удастся достичь важных преимуществ: удешевить и ускорить процесс выбора рациональных параметров проектного решения в гидротехническом строительстве, дать достаточное обоснование принятому решению перед его окончательной проверкой физическим моделированием. Создание подобной численной модели позволит также получить результаты в ситуациях, когда физическое моделирование применить затруднительно — например, в силу невозможности обеспечить выполнение критериев моделирования.

Таким образом, сочетание численных исследований предлагаемых проектных решений и физического моделирования конечного результата с целью подтвердить соответствие предъявляемым к нему требованиям отвечает потребностям проектных изысканий в гидротехническом строительстве.

## 1. Область применения численной модели гидроволновой лаборатории

Численная модель гидроволновой лаборатории может быть использована при решении разнообразных задач прикладной гидродинамики: изучении процессов взаимодействия регулярных, нерегулярных или уединенных волн с гидротехническими сооружениями и береговой инфраструктурой, при исследованиях последствий подобного взаимодействия — изменений рельефа в результате размыва и намыва, динамики транспорта наносов. На это указывает среди прочего достаточно обширная литература, посвященная “численным лоткам” (numerical flumes) и “численным бассейнам” (numerical basins) [1 – 5].

Поскольку численная модель гидроволновой лаборатории призвана частично заменить ее работу расчетными исследованиями, среди основных целей использования численной модели могут быть названы:

- 1) моделирование натуральных явлений без необходимости прибегать к уменьшенному масштабу;
- 2) проверка предсказаний теории распространения волн по поверхности воды при инженерном сопровождении проектирования гидротехнических сооружений и конструкций;
- 3) объяснение механизмов явлений, значимо сказывающихся при эксплуатации гидротехнических сооружений;
- 4) определение значений интересующих параметров взаимодействия волн с сооружением, соответствующих наихудшей возможной волновой ситуации вблизи конструкции при заданных параметрах волнения на глубокой воде.

Для надежного функционирования и непрерывного совершенствования численной модели необходима ее постоянная верификация как на полном наборе обязательных тестов для алгоритмов численного моделирования поверхностных волн [6], так и на появляющихся новых тестовых задачах, а также требуется разработка способов согласования условий физического и численного моделирования для обеспечения сопоставления получаемых результатов.

В качестве примеров исследований с применением физического моделирования, для которых использование численной модели гидроволновой лаборатории позволило бы достичь упомянутых ранее выгод, могут быть приведены следующие опыты.

1. Физическое моделирование воздействия волн цунами на район стоянки плавучего энергоблока в бухте Крашенинникова на Камчатке с учетом натурной батиметрии [7]. Конечной целью исследований являлось подтверждение устойчивости раскреплений плавучего энергоблока к воздействию волн цунами и измерение в районе его стоянки высоты волны, сформировавшейся в результате трансформации и дифракции волн цунами на защитных сооружениях бухты. Использование численной модели позволило бы выполнить рациональный выбор компоновки сооружений. Однако поиск такого решения с применением физического моделирования сопряжен с необходимостью перестройки пространственной модели и приводит к чрезмерному удорожанию выполнения работ, и без того обладающих высокой стоимостью.

2. Опыты по определению давления волн на вертикальные элементы откосного гидротехнического сооружения со сложным профилем лицевой грани [8]. Выполненные исследования по физическому моделированию при заданных параметрах воздействующего на сооружение волнения показали для данной задачи невозможность применения в ходе проектирования действующих нормативных документов для расчета парамет-

ров воздействия волн на сооружения типа вертикальной стенки. Применение численной модели гидроволновой лаборатории может объяснить качественно и количественно полученные результаты.

3. Эксперименты по определению механизмов образования ям размыва около гидротехнических сооружений, расположенных на морском шельфе [9] или на берегу [10], вызванных воздействием регулярных волн и волн цунами. Осуществить полное и исчерпывающее исследование возможно лишь при сочетании численных и экспериментальных методов [11].

Анализ литературы, посвященной представлению и обсуждению экспериментальных исследований процесса взаимодействия волн с гидротехническими сооружениями в условиях гидроволновых лабораторий, показывает, что наиболее типовыми задачами, решаемыми с помощью физического моделирования, являются следующие.

В лабораторных лотках (“плоская” задача) изучается взаимодействие волн с сооружениями при условиях: 1) дно горизонтальное, сооружение представляет собой плоский откос [12–15]; 2) дно неровное, сооружение имеет вид откоса сложной формы [16–18].

В лабораторных бассейнах (“пространственная” задача) при экспериментальном изучении взаимодействия волн с сооружениями используют следующие предположения: 1) дно ровное, сооружение имеет простую форму (например, остров конической формы [19, 20]); 2) переменная батиметрия, сооружение имеет сложную форму [7, 21, 22].

Существенную угрозу для безопасной эксплуатации гидротехнических сооружений представляет собой размыв их оснований. Поэтому среди часто решаемых экспериментально задач по изучению взаимодействия волн с разнообразными объектами — лабораторные исследования эрозии и размыва грунта от воздействия волн [9, 23–32].

Таким образом, спектр задач, для которых используются методы физического моделирования процессов взаимодействия волн с гидротехническими сооружениями, достаточно широк и разнообразен. Численная модель гидроволновой лаборатории должна позволять решать задачи указанного типа.

## 2. Способы генерации волн в лабораторных условиях

При сопоставлении результатов, получаемых в численной модели гидроволновой лаборатории и в ходе физического моделирования, необходимо согласование и подобие принципов генерации волн в ходе опытных и расчетных исследований.

Анализ литературы, посвященной экспериментальным установкам, применяемым в гидроволновых лабораториях, показывает, что наиболее распространенный способ генерации волн в гидроволновых лотках и бассейнах — это использование стационарного волнопродуктора поршневого типа. Работа такого волнопродуктора заключается в перемещении в воде подвижного вертикального щита по заданному закону с помощью пневматического или другого привода (рис. 1, а). Привод имеет цифровое управление, и потому есть возможность обеспечить генерацию волн заданного профиля с достаточно высокой точностью, а также нерегулярного волнения. Как правило, программы управления такими волнопродукторами позволяют производить наладку обратной связи на основе показаний волномеров, установленных на физической модели, с целью корректировки закона управления. Широкое распространение генераторов волнения поршневого типа объясняется их универсальностью: с их помощью можно создавать не только регулярное и нерегулярное волнение, но и уединенные волны типа цунами.

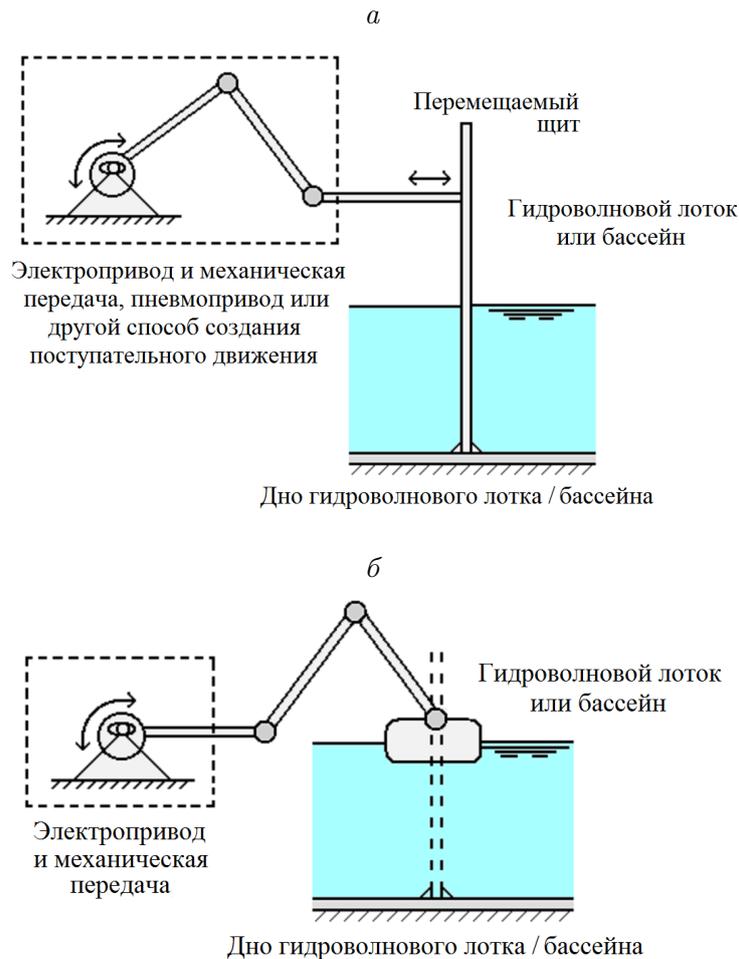


Рис. 1. Пояснение принципа работы лабораторного генератора волнения: *а* — со щитом, перемещаемым в горизонтальном направлении; *б* — с балкой, перемещаемой в вертикальном направлении

На рис. 2 приведен пример профиля волны типа цунами, созданной с помощью такого волнопродуктора. Видно, что профиль волны практически симметричен и близок к классическому солитону.

Другим, не менее распространенным способом генерации волнения выступают волнопродукторы типа “ныряло”, осуществляющие перемещение в воде подвижной балки по вертикальным направляющим (рис. 1, *б*).

Еще один способ генерации уединенных волн заключается в использовании вакуумного генератора, который представляет собой помещенную в воду камеру, соединенную с вакуумным насосом и снабженную клапаном (рис. 3). В нижней части камеры имеется щель для поступления воды из гидроволнового лотка или бассейна. Камера изолирована от самопроизвольного поступления в ее внутренний объем атмосферного воздуха. Для целенаправленной подачи атмосферного воздуха внутрь камеры на ней установлен специальный клапан, открытие которого осуществляется управляемым золотником.

Генерация волны цунами таким волнопродуктором происходит следующим образом. На первом этапе производится набор воды во внутренний объем камеры. Во время набора воды клапан обеспечивает герметичность, вакуумный насос откачивает воздух, вода

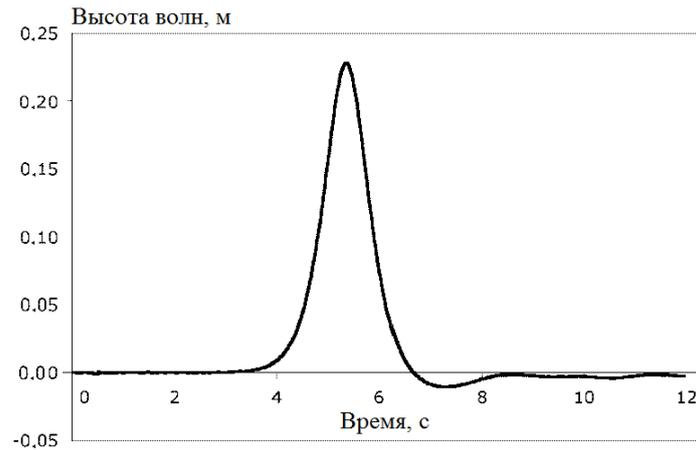


Рис. 2. Пример профиля волны, созданной с помощью поршневого волнопродуктора с таким же законом движения щита, как в работе [33]

из заполненного лотка или бассейна забирается в камеру, уровень воды в последней поднимается. При достижении уровнем воды в камере определенного значения клапан дистанционно открывается, воздух попадает в камеру, набранная вода через щель поступает обратно в лоток или бассейн, обрушиваясь под собственной силой тяжести. Профиль волны (рис. 4), созданной таким образом, приближен к форме реальных волн, наблюдаемых в открытом море и океане.

В ряде работ (например, [34]) отмечается, что использование солитона в качестве физической модели волны цунами не является правомерным, поскольку волны цунами, регистрируемые в условиях открытого моря и его прибрежной зоны, как правило, имеют форму, отличную от солитона. Поэтому при физическом моделировании естественных условий важно обеспечить возникновение волны цунами (подводные и надводные

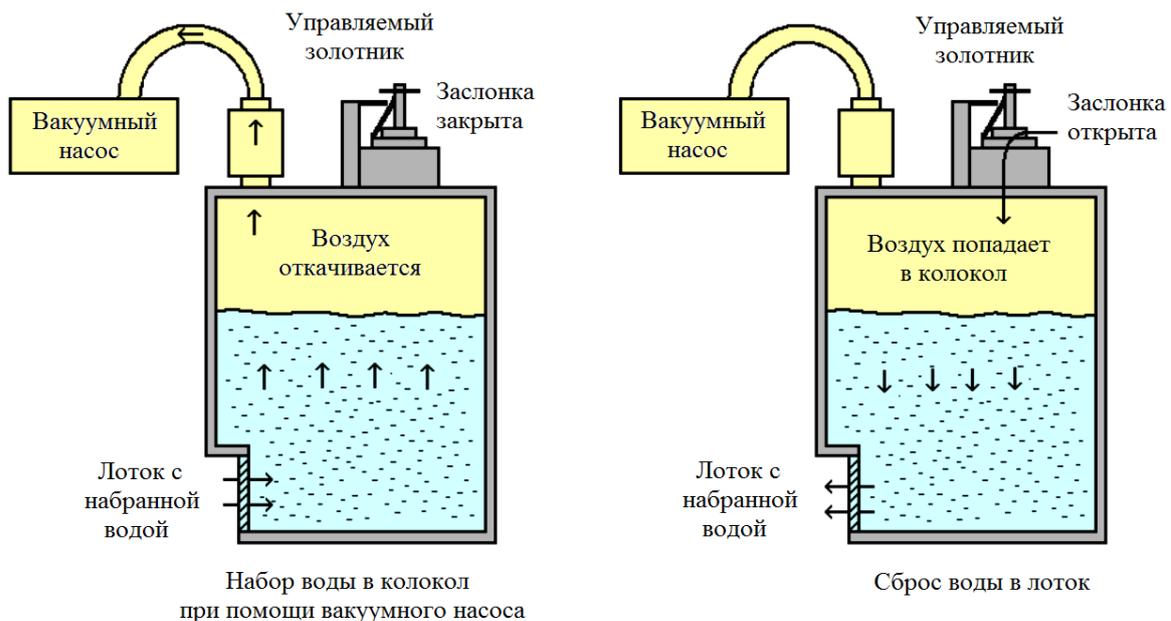


Рис. 3. Принцип работы лабораторного вакуумного генератора волны цунами

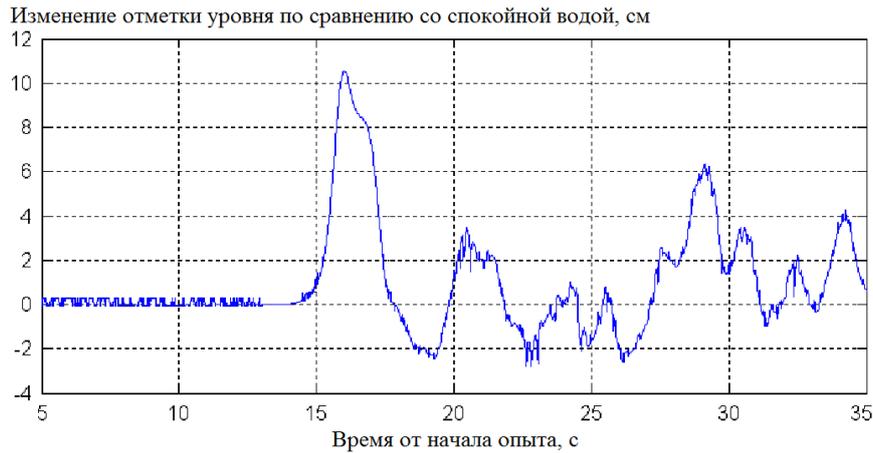


Рис. 4. Профиль волны цунами, созданной вакуумным волнопродуктором

оползни, подвижка морского дна и т. д.). Использование вакуумного волнопродуктора отвечает этой цели, поскольку представляет собой физический аналог подвижки морского дна, приводящей к почти мгновенному изменению поверхности воды, вызывающей в конечном итоге образование волн цунами.

При создании численной модели гидроволновой лаборатории необходимо использовать перечисленные выше методы генерации волнения.

### 3. Требования к программному обеспечению численной модели гидроволновой лаборатории

Представляется перспективной разработка программного продукта, реализующего численную модель гидроволновой лаборатории. Существующее программное обеспечение в области прикладной гидродинамики, хорошо себя зарекомендовавшее и широко используемое, в основном касается вопросов распространения волн по поверхности воды, однако дает не так уж много возможностей для проектировщиков, поскольку обычно использует самые грубые и упрощенные способы формализации и представления гидротехнических сооружений. Это обстоятельство препятствует применению имеющихся программных продуктов в процессе проектирования гидротехнических сооружений. Становится актуальной разработка специализированного программного обеспечения для нужд проектных организаций и гидроволновых лабораторий.

По мнению авторов настоящей работы, чтобы программный продукт мог быть включен в процесс проектирования гидротехнических сооружений, он должен удовлетворять следующим требованиям:

- 1) наличие простого и понятного для инженера-проектировщика пользовательского интерфейса. Удобный графический способ задания и отображения геометрических размеров и профилей гидротехнических сооружений в “численном лотке” и “численном бассейне” позволит обеспечить наглядность выполняемых в численной лаборатории экспериментов;
- 2) возможность задавать пользователем критерии и условия, которым должно удовлетворять проектируемое сооружение. Результаты проверки соответствия этим критериям и условиям должны быть наглядными (например, в виде таблицы с отметками “соответствует” или “не соответствует”);

- 3) наличие библиотеки сведений о механических и других характеристиках материалов, используемых в гидротехническом строительстве;
- 4) возможность работы с неточными входными данными, поскольку значения тех или иных характеристик и параметров гидротехнических сооружений и их элементов на практике могут варьироваться в некоторых пределах;
- 5) возможность запуска серии экспериментов, чтобы в случае, если расчет каждого эксперимента занимает существенное время, выполнить последовательность экспериментов без необходимости перезапуска программы каждый раз по завершении предыдущего опыта;
- 6) возможность решения задачи оптимизации (хотя бы частичной) характеристик проектируемого сооружения. При реализации п. 5 данного списка это становится возможным.

Представляется, что выполнение указанных требований будет способствовать быстрому внедрению численной гидроволновой лаборатории в процесс проектирования в гидротехническом строительстве.

## 4. Математические технологии численной гидроволновой лаборатории

Для создания численной модели гидроволновой лаборатории предполагается использовать имеющиеся на сегодня отдельные элементы математической технологии (математические модели, численные алгоритмы, программы), из которых в будущем предстоит создать единый инструмент для сопровождения задач физического моделирования, в частности задач, упомянутых в разд. 2.

### 4.1. Математические модели течений воды с поверхностными волнами

Для численного исследования поверхностных волн на воде будет применена иерархия математических моделей (уравнения Навье — Стокса, модель потенциальных течений, нелинейно-дисперсионные уравнения второго длинноволнового приближения, уравнения мелкой воды первого приближения), описывающих течения в различных приближениях (трехмерные, плановые, одномерные). Использование не одной, а целой иерархии математических моделей для изучения каждого конкретного явления повысит степень достоверности численных результатов и попутно позволит определить области применимости моделей более низкого уровня. Иерархический подход позволит существенно экономить на проведении многовариантных и ресурсоемких расчетов за счет использования, где это возможно, менее затратного математического моделирования на основе моделей более низкого уровня, обеспечивающих необходимые точность и достоверность результатов.

На верхнем уровне иерархической цепочки находится модель [35, 36], основанная на уравнениях Навье — Стокса для движения смеси двух вязких несжимаемых смешивающихся жидкостей (воздух и вода) с разными значениями плотности и вязкости. При таком подходе область течения имеет неподвижную верхнюю границу, а жидкость рассматривается как сплошная среда с неоднородными характеристиками плотности и вязкости. Свободная граница не выделяется. При необходимости ее можно приближенно определить по вычисленным значениям концентрации более тяжелого и вязкого компонента (воды). Трехкомпонентная (воздух, вода и грунт) версия этой математи-



ческой модели [37] может использоваться для исследования размыва донного грунта под воздействием внутренних течений и поверхностных волн.

Во многих случаях можно пренебречь влиянием вязкости и рассматривать математические постановки в рамках модели идеальной несжимаемой жидкости, в частности модели потенциальных течений жидкости [7, 38, 39] в областях с подвижными частями границы. В рассматриваемых задачах подвижными частями границы области течения являются верхняя свободная граница жидкости, непроницаемые подвижные стенки бассейна (в задачах генерации волн различными волнопродукторами) или подвижные фрагменты дна (в задачах генерации волн подводным оползнем).

Уравнения Эйлера для идеальной жидкости и уравнения Навье—Стокса для вязких течений описывают гидродинамические процессы во всем спектре движений. Однако расчеты в больших гидроволновых бассейнах в рамках этих трехмерных моделей требуют зачастую непомерно больших ресурсов. В случае моделирования поверхностных волн, распространяющихся на “мелкой воде”, когда горизонтальные компоненты вектора скорости преобладают над вертикальной составляющей, расчеты можно сделать более эффективными, если перейти к моделям более низкого уровня иерархической цепочки: нелинейно-дисперсионным моделям [40] или бездисперсионной модели мелкой воды. Поскольку в нелинейно-дисперсионных моделях учитываются негидростатическая составляющая давления и дисперсионная составляющая вектора скорости, результаты расчетов в рамках этой модели можно использовать для восстановления [40] с приемлемой точностью полей давления и вектора скорости трехмерных течений.

## 4.2. Численные алгоритмы

Естественно, что использование иерархии математических моделей приводит к необходимости применения иерархии вычислительных алгоритмов.

Для численного решения уравнений Навье—Стокса используется неявная конечно-разностная схема первого порядка аппроксимации на прямоугольной разнесенной сетке [36, 37]. Численный алгоритм основан на методе расщепления по физическим факторам с учетом переменной плотности. Наиболее ресурсоемкая часть алгоритма сосредоточена на втором этапе метода дробных шагов, на котором итерационным методом решается неоднородное уравнение эллиптического типа с переменными коэффициентами для давления. На каждом шаге по времени методом предиктор-корректор решаются также уравнения диффузии для концентраций компонентов (одно в случае двухкомпонентной жидкости и два — для трехкомпонентной). Поскольку в этом алгоритме свободная граница жидкости и граница подвижного донного грунта не выделяются, имеют место известные преимущества алгоритмов “сквозного” счета, в частности выполнение расчетов в областях простой формы с неподвижными границами и возможность расчета обрушающихся волн. При интерпретации результатов приближенные положения подвижных границ можно найти по вычисленным значениям концентрации водного компонента, ограниченного снизу тяжелым компонентом донного грунта, а сверху — воздухом.

Для модели потенциальных течений коллективом авторов используются два численных метода, причем оба — с явным выделением свободной границы: метод граничных элементов [41] и конечно-разностный метод на адаптивных сетках [42].

Метод граничных элементов [41] весьма экономичен и точен, поскольку дискретизации подвергается только граница расчетной области (внутри области сетка не строится)

и он (как и все его модификации), в сущности, является полуаналитическим методом, поскольку для вычисления параметров течения во внутренних точках используются аналитические формулы теории гармонических функций или функций комплексного переменного. Невозможность переноса алгоритма на случай вихревых течений жидкости — наиболее существенный недостаток метода.

Более ресурсоемким является метод адаптивных сеток [42], так как при его использовании необходимо строить сетку не только на границе области, но и внутри, причем на каждом шаге по времени, поскольку сетка должна адаптироваться ко всем подвижным частям границы. Кроме того, на каждом шаге по времени приходится с помощью итерационных методов решать эллиптическое уравнение с переменными коэффициентами для вычисления потенциала вектора скорости на новом временном слое. Тем не менее именно этот метод использовался для решения многих практических задач, для которых выполнялись лабораторные исследования взаимодействия поверхностных волн с реальными конструкциями и препятствиями. Одним из достоинств метода является принципиальная возможность переноса численного алгоритма на случай вихревых течений идеальной несжимаемой жидкости.

Для численного решения задач в рамках нелинейно-дисперсионных моделей используется алгоритм метода расщепления [43, 44], сводящий сложную плановую задачу к двум более простым: начально-краевой задаче для системы нелинейных уравнений гиперболического типа и краевой задаче относительно дисперсионной составляющей давления для линейного уравнения эллиптического типа с переменными коэффициентами. На каждом шаге по времени первая задача решается методом предиктор-корректор с использованием схемы второго порядка аппроксимации, вторая задача аппроксимируется схемой также второго порядка и решается итерационным методом. Численный метод допускает использование адаптивных сеток, учитывающих подвижность части границ гидроволнового бассейна.

### 4.3. Численные модели волнопродукторов

Первоначально в численных расчетах, в отличие от лабораторных экспериментов, начальная волна задавалась в виде солитона, форма и скорость движения жидкости для которого определялись из решения соответствующей дифференциальной задачи. Было показано, что расхождение в задании начальных данных приводит к заметному отличию получаемых результатов взаимодействия волн с сооружениями. Поэтому для количественного соответствия численных результатов опытным данным необходимо, среди прочего в расчетах и лабораторных экспериментах опираться на один и тот же принцип генерации волн.

Такой единый принцип использовался в задачах генерации волн поршневым волнопродуктором. В качестве примера на рис. 5 приведены данные, относящиеся к решению тестовой задачи о распространении и трансформации волн над кусочно-линейным дном, представляющим собой горизонтальный участок, связанный с системой из трех соединенных друг с другом откосов с различными уклонами, последний из которых примыкает к вертикальной непроницаемой стенке (рис. 5, *a*). Для этой задачи имеются приближенное аналитическое решение и экспериментальные данные [18], поэтому задача была включена в набор обязательных тестов [6] для алгоритмов численного моделирования цунами. В эксперименте волна генерировалась движением вертикального щита и распространялась слева направо по направлению к вертикальной стенке. В расчетах подвижность левой вертикальной стенки расчетной области учитывается

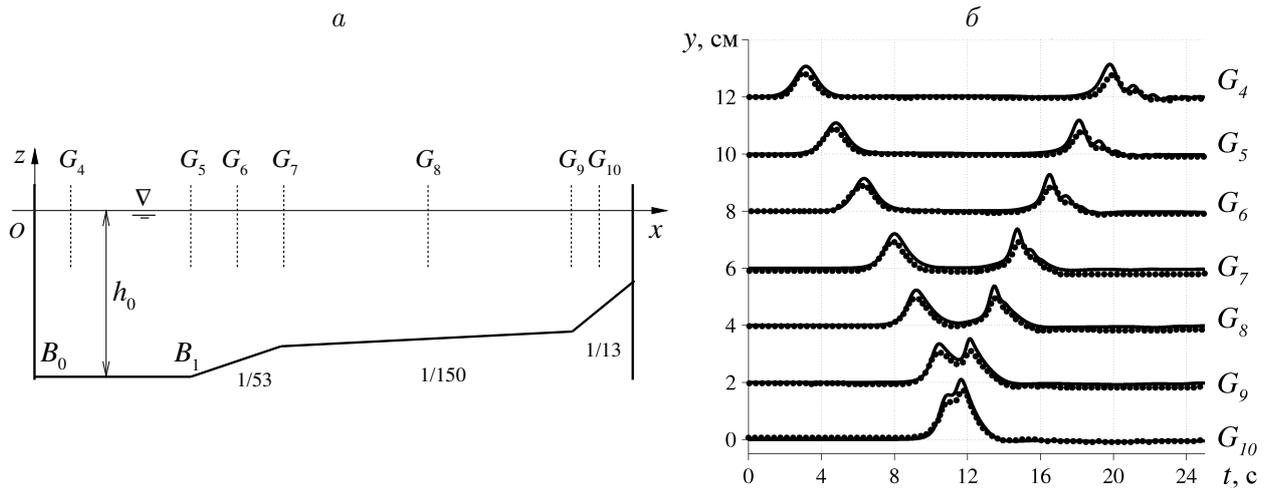


Рис. 5. Трансформация одиночной волны при ее движении над кусочно-линейным дном и отражении от вертикальной стенки: *а* — схема гидроволнового лотка и расположение волномеров; *б* — записи волномеров в эксперименте (маркеры) и расчете (сплошная линия)

за счет применения подвижных сеток, отслеживающих положение стенки, при этом используется такой же закон движения стенки, как и закон движения щита поршневого волнопродуктора в лабораторном эксперименте. Результаты сравнения (см., например, рис. 5, *б*) демонстрируют, что расчеты на основе модели потенциальных течений достаточно хорошо соотносятся с экспериментальными данными.

Для численного воспроизведения физических экспериментов, в которых для генерации волн использовался лабораторный волнопродуктор типа “ныряло”, также применялся принцип подобия механизмов генерации волн. Периодические волны (либо нерегулярное волнение) генерировались с помощью “численного” волнопродуктора типа “ныряло” (рис. 6, *а*), который генерирует волны за счет периодических (либо заданных некоторым законом) вертикальных движений непроницаемой горизонтальной пластины, лежащей на поверхности воды. В расчетах предполагается, что пластина не деформируется и вода не отрывается от нижней грани пластины. Генерирование периодических волн заданных высоты и длины (рис. 6, *б*) осуществлялось подбором подходящих значений периода и амплитуды колебаний горизонтальной пластины.

В численных экспериментах, повторяющих опыты с применением вакуумного лабораторного волнопродуктора, также использовался идентичный способ генерации начальной волны, а именно способ генерации с помощью “численного” вакуумного волнопродуктора, который представляет собой прямоугольную область, заполненную покоящейся водой до заданного при физическом моделировании уровня и отгороженную от лотка тонкой вертикальной стенкой. Эта стенка в начальный момент времени мгновенно поднимается вверх на высоту, равную величине зазора между дном и передней стенкой реального волнопродуктора. Вытекающая в лоток вода генерирует одиночную волну и цуг сопровождающих ее волн меньшей амплитуды. Появление этого цуга обусловлено колебаниями свободной границы в самом волнопродукторе [38], вызванными обрушением столба жидкости и ее нестационарным вытеканием через придонный зазор.

Использование похожих механизмов генерации начальной волны обеспечило хорошее соответствие результатов численного моделирования и лабораторных измерений

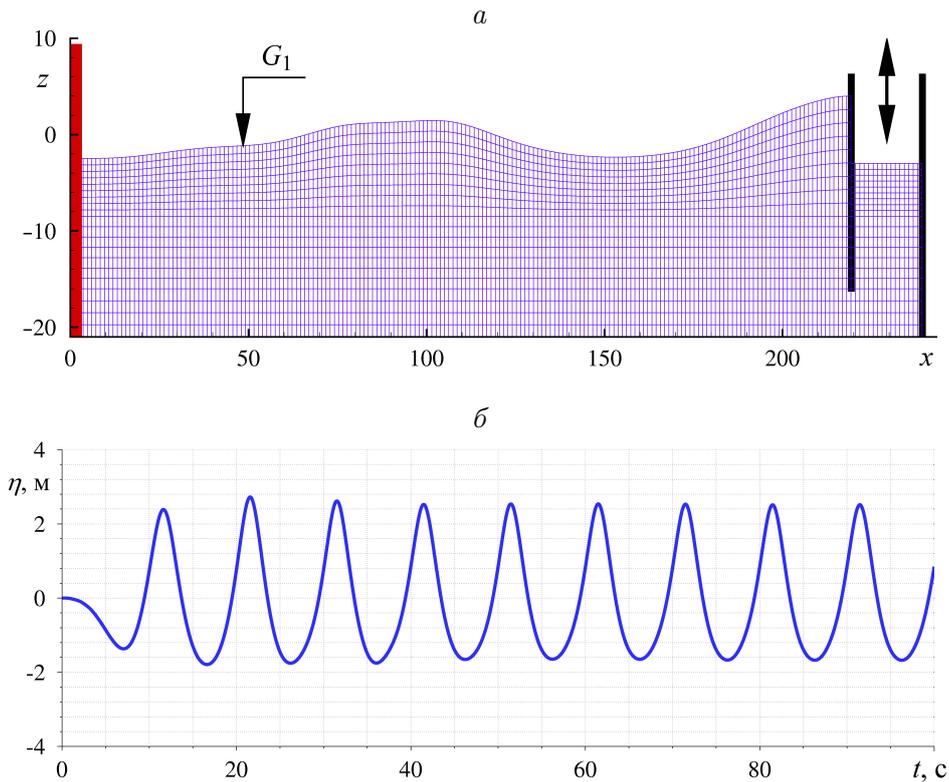


Рис. 6. “Численный” волнопродуктор типа “ныряло”: *a* — схема расчетной области; *b* — пример сгенерированной волны (запись волномера  $G_1$ )

по максимальным значениям заплесков волн на сооружения и максимальным значениям волнового давления на них. Однако профиль численной начальной волны при таком способе генерации отличался от экспериментального (см. рис. 4) формой и амплитудой волн в дисперсионном хвосте, что вносило некоторые искажения в детали картины взаимодействия волн с сооружениями. Причина такого несоответствия видится в том, что в численных расчетах давление воздуха на поверхность воды внутри волнопродуктора в начальный момент времени принималось равным атмосферному, т. е. не учитывался тот факт, что в реальном волнопродукторе, принцип работы которого описан в разд. 2, после открытия клапана воздух проникает в колокол не мгновенно и давление в нем нарастает до атмосферного в течение некоторого небольшого промежутка времени.

Этот недостаток устранен в работе [39], в которой учитывается конечная скорость втекания воздуха через клапан волнопродуктора, при этом воздух считается баротропным газом, а вода — идеальной жидкостью. После такой модификации “численного” вакуумного волнопродуктора получилось очень хорошее совпадение расчетных значений с экспериментальными при одинаковых высотах набора воды в колокол как по высотам основной волны, так и по профилям волн в дисперсионном хвосте начальной волны. Большого соответствия можно добиться при учете вязкости воды и воздуха [35].

#### 4.4. Сопоставление результатов численных расчетов с опытными данными

В ряде предыдущих работ выполнено сравнение результатов, полученных с применением имеющихся программ, с опытными данными. Достигнутое количественно соответствие признано удовлетворительным для практических нужд.

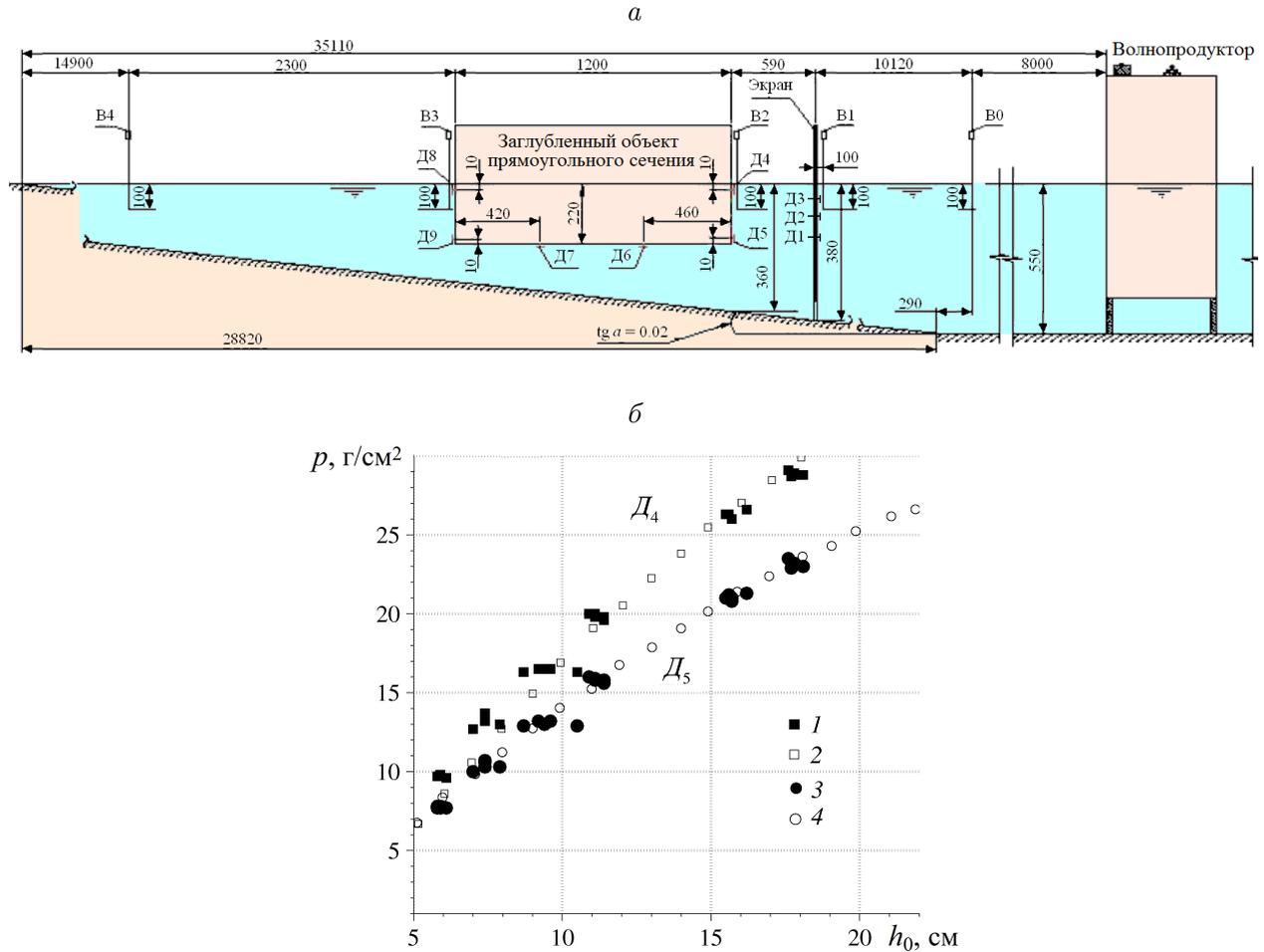


Рис. 7. Взаимодействие уединенной волны с неподвижным полупогруженным телом: *a* — схема гидроволнового лотка с размещенным в нем телом, защитным экраном и измерительными устройствами; *б* — графики зависимостей максимальных значений волнового давления  $p$  от амплитуды  $h_0$  набегающей волны, измеренных датчиками Д4 (1, 2) и Д5 (3, 4) в экспериментах (1, 3) и расчетах (2, 4)

Изучению взаимодействия одиночных волн с плавучим объектом, расположенным за частично заглубленными непроницаемым или частично проницаемым защитными экранами (рис. 7), посвящены работы [7, 38, 45, 46], изучению взаимодействия поверхностных волн с сооружением, представляющим собой откос сложной формы (рис. 8), — работы [8, 47], изучению поверхностных волн, возникающих при движении подводного оползня (рис. 9), — работы [48–50]. Авторским коллективом были исследованы также вопросы, связанные с моделированием вакуумного волнопродуктора [35, 39, 51].

## Заключение

Рассмотрены вопросы, связанные с построением и областью применения численной модели гидроволновой лаборатории как перспективного направления развития инженерного сопровождения процесса проектирования в гидротехническом строительстве. Показано, что создание такой модели поможет удешевить и ускорить ряд этапов проектных работ, в частности существенно повысить эффективность лабораторных экспе-

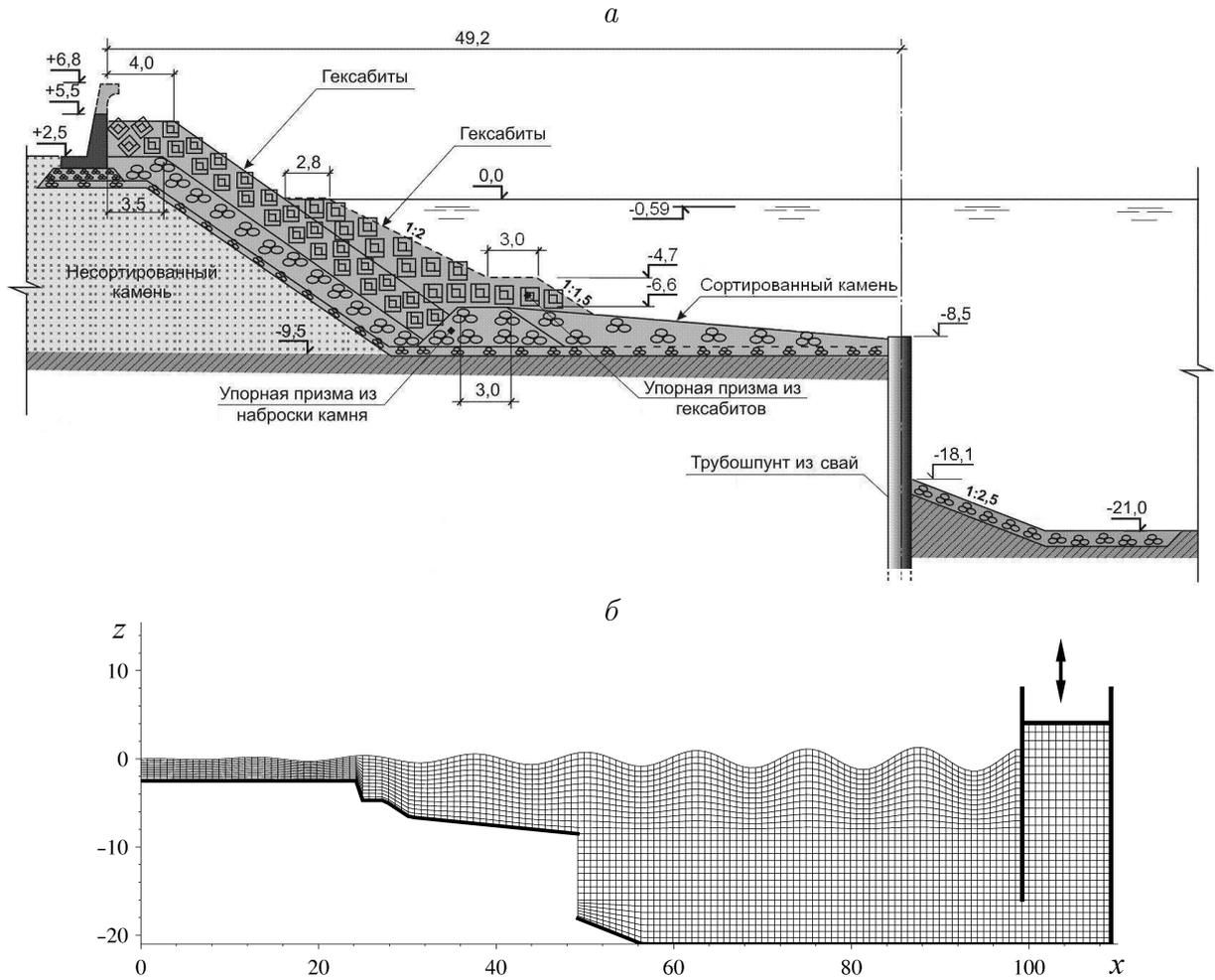


Рис. 8. Воздействие периодических волн на откос сложной формы: *a* — физическая модель исследуемого сооружения; *б* — схема расчетной области

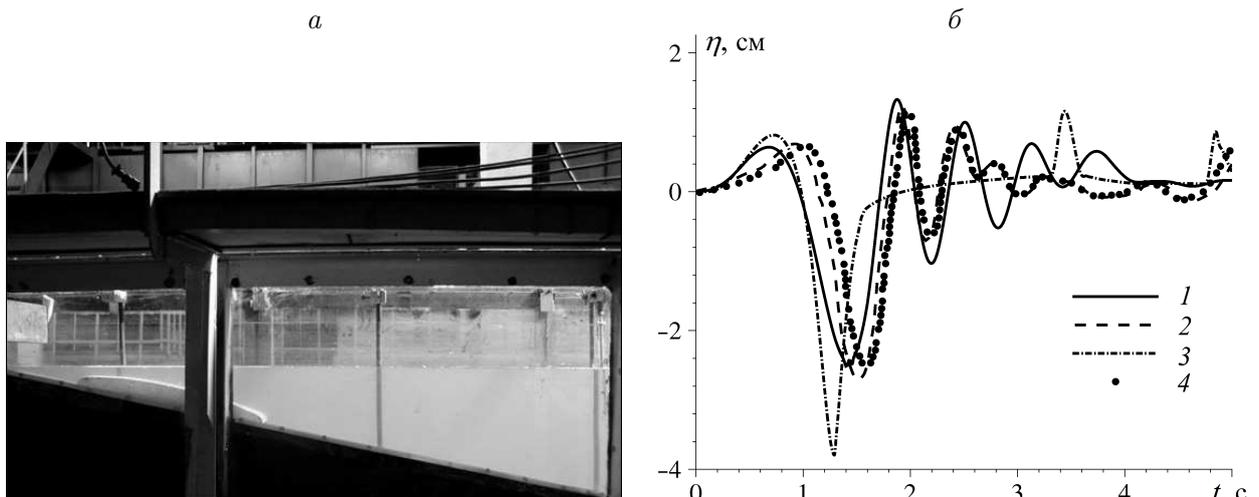


Рис. 9. Генерация волн подводным оползнем: *a* — гидроволновой лоток с твердой моделью оползня на дне; *б* — мареграммы в точке  $x = 0.9$  м, полученные в рамках нелинейно-дисперсионной модели (1), модели потенциальных течений жидкости (2), бездисперсионной модели мелкой воды (3) и в лабораторных экспериментах [48] (4)

риментов. Отмечено, что численная лаборатория, безусловно обладающая самостоятельной ценностью и значимостью, должна использоваться в сочетании с физическим моделированием итогового проектного решения.

В работе представлены математические модели и численные алгоритмы, позволяющие численно моделировать процессы генерации волнения, реализуемые основными типами лабораторных волнопродукторов, процессы распространения волн и их взаимодействия с различными сооружениями. Выполненное сопоставление результатов численных расчетов и опытных исследований показывает хорошее количественное соответствие, что указывает на возможность использования этих элементов математической технологии как основы для проектируемой численной модели гидроволновой лаборатории. Так как сегодня имеется только набор отдельных программ, предстоит большая работа по их объединению в единый инструмент, удобный для пользователя и удовлетворяющий требованиям, перечисленным в разд. 3.

Считаем, что развитие данного направления прикладной гидродинамики имеет важное значение для гидротехнического строительства, поскольку использование численной модели гидроволновой лаборатории позволит при меньших трудозатратах обеспечить получение лучшего проектного решения.

**Благодарности.** Исследование выполнено при поддержке Программы Президиума РАН № 27 “Фундаментальные проблемы решения сложных практических задач на основе высокопроизводительных вычислений”.

## Список литературы / References

- [1] **Vyzikas, T., Stagonas, D., Buldakov, E., Greaves, D.** The evolution of free and bound waves during dispersive focusing in a numerical and physical flume // *Coastal Engineering*. 2018. Vol. 132. P. 95–109.
- [2] **Riefolo, L., Contestabile, P., Vicinanza, D.** Seiching induced by bichromatic and monochromatic wave conditions: experimental and numerical analysis in a large wave flume // *J. of Marine Science and Engineering*. 2018. Vol. 6, No. 2. Paper 68.
- [3] **Troch, P.A., De Rouck, J.** Development of two-dimensional numerical wave flume for wave interaction with rubble mound breakwaters // *Proc. of the Coastal Engineering Conf.* 1998. Vol. 2. P. 1638–1649.
- [4] **Isobe, M., Takahashi, S., Yu, S.P. et al.** Interim development of a numerical wave flume for maritime structure design // *Proc. of Civil Engineering in the Ocean*. 1999. Vol. 15. P. 321–326.
- [5] **Dong, C.M., Huang, C.J.** Generation and propagation of water waves in a two-dimensional numerical viscous wave flume // *J. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*. 2004. Vol. 130, No. 3. P. 143–153.
- [6] **Synolakis, C.E., Bernard, E.N., Titov, V.V. et al.** Standards, criteria, and procedures for NOAA evaluation of tsunami numerical models: NOAA Techn. Memorandum OAR PMEL-135. USA, Seattle, WA: Pacific Marine Environm. Lab. 2007. 60 p.
- [7] **Камынин Е.Ю., Максимов В.В., Нуднер И.С. и др.** Исследование взаимодействия уединенной волны с частично погруженным неподвижным сооружением // *Фундамент. и прикл. гидрофизика*. 2010. № 4(10). С. 39–54.  
**Kamynin, E.Yu., Maximov, V.V., Nudner, I.S. et al.** Study of interaction of the solitary wave with a partially submerged stationary construction // *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2010. No. 4(10). P. 39–54. (In Russ.)

- [8] **Бабчик Д.В., Максимов В.В., Нуднер И.С. и др.** Численное и экспериментальное исследование взаимодействия периодических волн с откосным сооружением сложного профиля // Тр. XI Всерос. конф. "Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики". СПб.: Наука, 2012. С. 198–200.  
**Babchik, D.V., Maximov, V.V., Nunder, I.S. et al.** Numerical and experimental studies of periodic waves interaction with a sloping construction of a complex profile // Proc. of the XIth All-Russ. Conf. "Applied Technologies of the Hydroacoustics and Hydrophysics". St.-Petersburg, Nauka, 2012. P. 198–200. (In Russ.)
- [9] **Nakamura, T., Kuramitsu, Y., Mizutani, N.** Tsunami scour around a square structure // J. of Coastal Engineering. 2008. Vol. 50, No. 2. P. 209–246.
- [10] **Yeh, H., Tonkin, S., Heller, E. et al.** Mechanisms of scour induced by tsunami runup // Proc. of Second Intern. Conf. on Scour and Erosion. Singapore: Meritus Mandarin, 2004. Vol. 2. P. 464–471.
- [11] **Gaydarov, N.A., Zakharov, Y.N., Ivanov, K.S. et al.** Numerical and experimental studies of soil scour caused by currents near foundations of gravity-type platforms // Proc. of the 2014 Intern. Conf. on Civil Engineering, Energy and Environment (CEEE 2014). Hong Kong, 2014. P. 190–196.
- [12] **Synolakis, C.E.** The runup of long waves: Ph.D. Thesis. Pasadena, California Institute of Technology, 1986. 228 p.
- [13] **Synolakis, C.E.** The runup of solitary waves // J. of Fluid Mechanics. 1987. Vol. 185, No. 6. P. 523–545.
- [14] **Hall, J.V., Watts, J.W.** Laboratory investigation of the vertical rise of solitary waves on impermeable slopes // Technical Memorandum No. 33. Beach Erosion Board, U.S. Army Corps of Engineers, 1953. 14 p.
- [15] **Pedersen, G., Gjevik, B.** Run-up of solitary waves // J. of Fluid Mechanics. 1983. Vol. 135. P. 283–299.
- [16] **Yeh, H., Liu, P., Synolakis, C.E.** Long-wave runup models. Singapore: World Sci. Publ., 1996. 403 p.
- [17] **Kanoglu, U.** The runup of long waves around piecewise linear bathymetries: Ph.D. Thesis. Los Angeles, California, Univ. of Southern California, 1998. 273 p.
- [18] **Kanoglu, U., Synolakis, C.E.** Long wave runup on piecewise linear topographies // J. of Fluid Mechanics. 1998. Vol. 374. P. 1–28.
- [19] **Briggs, M.J., Synolakis, C.E., Harkins, G.S., Green, D.R.** Laboratory experiments of tsunami runup on circular island // Pure and Applied Geophysics. 1995. Vol. 144, No. 3/4. P. 569–593.
- [20] **Liu, P.L.-F., Cho, Y.-S., Briggs, M.J. et al.** Runup of solitary waves on a circular island // J. of Fluid Mechanics. 1995. Vol. 302. P. 259–285.
- [21] **Takahashi, T.** Benchmark problem 4. The 1993 Okushiri tsunami — data, conditions and phenomena // Long-Wave Runup Models / Eds H. Yeh, P.L.-F. Liu, C.E. Synolakis. Singapore: World Sci. Publ., 1996. P. 384–403.
- [22] **Liu, P. L.-F., Yeh, H., Synolakis, C.** Benchmark Problems // Advances in Coastal and Ocean Engineering. Vol. 10: Advanced Numerical Models for Simulating Tsunami Waves and Runup. Singapore: World Sci. Publ., 2011. P. 223–230.
- [23] **Kato, F., Sato, S., Yeh, H.** Large-scale experiment on dynamic response of sand bed around a cylinder due to tsunami // Proc. of 27th Intern. Conf. on Coastal Engineering. ASCE, Sydney, Australia, 2000. P. 1848–1859.



- [24] **Tonkin, S., Yeh, H., Kato, F., Sato, S.** Tsunami scour around a cylinder // *J. of Fluid Mechanics*. 2003. Vol. 496. P. 165–192.
- [25] **Young, Y.L., Xiao, H., Maddux, T.** Hydro- and morphodynamic modeling of breaking solitary waves over a fine sand beach. Pt I: Experimental study // *Marine Geology*. 2010. Vol. 269, No. 3–4. P. 119–131.
- [26] **Kobayashi, N., Lawrence, A.R.** Cross-shore sediment transport under breaking solitary waves // *J. of Geophysical Research*. 2004. Vol. 109. C030047.
- [27] **Chen, J., Huang, Z.H., Jiang, C.B. et al.** An experimental study of changes of beach profile and man grain size caused tsunami-like waves // *J. of Coastal Research*. 2012. Vol. 28, No. 5. P. 1303–1312.
- [28] **Chen, J., Huang, Z., Jiang, C. et al.** Tsunami-induced scour at coastal roadways: a laboratory study // *Natural Hazards*. 2013. Vol. 69. P. 655–674.
- [29] **Tsujimoto, G., Yamada, F., Kakinoki, T.** Time-space variation and spectral evolution of sandy beach profiles under tsunami and regular waves // *Proc. of the Intern. Offshore and Polar Engineering Conf., Vancouver, Canada, 2008*. P. 523–527.
- [30] **Sumer, B.M., Sen, M.B., Karagali, I. et al.** Flow and sediment transport induced by a plunging solitary wave // *J. Geophysical Research*. 2011. Vol. 116. Paper C01008.
- [31] **Nakamura, T., Kuramitsu, Y., Mizutani, N.** Tsunami-induced local scour around a square structure // *Proc. of the Solutions to Coastal Disasters Congress. ASCE, Sydney, Australia, 2008*. P. 106–117.
- [32] **Young, Y.L., Xiao, H., White, J.A., Borja, R.I.** Can tsunami drawdown lead to liquefaction failure of coastal sandy slopes? // *The 14th World Conf. on Earthquake Engineering, Beijing, China, 2008*. Available at: <http://www.14wcee.org/Proceedings/isv7/main.htm>
- [33] **Yim, S., Yeh, H., Cox, D., Pancake, C.** A shared-use large-scale multidirectional wave basin for remote tsunami research // *The Thirteenth World Conf. on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, 2004*. Paper 1517.
- [34] **Madsen, P.A., Fuhrman, D.R., Schäffer, H.A.** On the solitary wave paradigm for tsunamis // *J. of Geophysical Research*. 2008. Vol. 113, iss. C12. Paper C12012.
- [35] **Захаров Ю.Н., Зимин А.И., Стуколов С.В. и др.** Численное моделирование работы лабораторного волнопродуктора одиночных волн на воде // *Тр. Третьей междунар. конф. “Полярная механика”, Владивосток, 2016*. С. 954–964.  
**Zakharov, Yu.N., Zimin, A.I., Stukolov, S.V. et al.** Numerical modeling of the experimental wavemaker of a single waves // *Proc. of the Intern. Sci. Conf. “Polar Mechanics-2016”. Vladivostok, 2016*. P. 954–964. (In Russ.)
- [36] **Zakharov, Y., Zimin, A., Ragulin, V.** Two-component incompressible fluid model for simulating surface wave propagation // *Math. Modeling of Technolog. Processes*. 2015. Vol. 549. P. 201–210.
- [37] **Zakharov, Y.N., Zimin, A.I.** Numerical simulation of surface waves arising from underwater landslide movement // *Conf. Proc. “Mathematical and Information Technologies MIT-2016”*. 2017. P. 535–546.
- [38] **Нуднер И.С., Семенов К.К., Хакимзянов Г.С., Шокина Н.Ю.** Исследование взаимодействия длинных морских волн с сооружениями, защищенными вертикальными экранами // *Фундамент. и прикл. гидрофизика*. 2017. Т. 10, № 4. С. 31–43.  
**Nudner, I.S., Semenov, K.K., Khakimzyanov, G.S., Shokina, N.Yu.** Investigations of the long marine waves interaction with the structures protected by the vertical barriers // *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2017. Vol. 10, No. 4. P. 31–43. (In Russ.)

- [39] **Афанасьев К.Е., Стуколов С.В.** Численное моделирование работы опытового генератора одиночных поверхностных волн // Вестн. КемГУ. 2013. № 3(55). С. 6–14.  
**Afanasiev, K.E., Stukolov, S.V.** Numerical simulation of experimental generator of single surface waves // Bull. of Kemerovo State Univ. 2013. No. 3(55). P. 6–14. (In Russ.)
- [40] **Khakimzyanov, G., Dutykh, D., Fedotova, Z., Mitsotakis, D.** Dispersive shallow water wave modelling. Pt I: Model derivation on a globally flat space // Commun. in Comput. Physics. 2018. Vol. 23, No. 1. P. 1–29.
- [41] **Афанасьев К.Е., Березин Е.Н.** Анализ динамических характеристик при взаимодействии уединенной волны с препятствием // Вычисл. технологии. 2004. Т. 9, № 3. С. 22–38.  
**Afanasiev, K.E., Berezin, E.N.** Analysis of dynamic characteristics in case of interaction of a solitary wave with an obstacle // Comput. Technologies. 2004. Vol. 9, No. 3. P. 22–38. (In Russ.)
- [42] Численное моделирование течений жидкости с поверхностными волнами / Г.С. Хакимзянов, Ю.И. Шокин, В.Б. Баракхин, Н.Ю. Шокина. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. 394 с.  
Numerical Simulation of Fluid Flows with Surface Waves / G.S. Khakimzyanov, Yu.I. Shokin, V.B. Barakhnin, N.Yu. Shokina. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2001. 394 p. (In Russ.)
- [43] **Гусев О.И., Шокина Н.Ю., Кутергин В.А., Хакимзянов Г.С.** Моделирование поверхностных волн, генерируемых подводным оползнем в водохранилище // Вычисл. технологии. 2013. Т. 18, № 5. С. 74–90.  
**Gusev, O.I., Shokina, N.Yu., Kutergin, V.A., Khakimzyanov, G.S.** Numerical modelling of surface waves generated by underwater landslide in a reservoir // Comput. Technologies. 2013. Vol. 18, No. 5. P. 74–90. (In Russ.)
- [44] **Гусев О.И.** Алгоритм расчета поверхностных волн над подвижным дном в рамках плановой нелинейно-дисперсионной модели // Вычисл. технологии. 2014. Т. 19, № 6. С. 19–40.  
**Gusev, O.I.** Algorithm for surface waves calculation above a movable bottom within the frame of plane nonlinear dispersive model // Comput. Technologies. 2014. Vol. 19, No. 6. P. 19–40. (In Russ.)
- [45] **Камынин Е.Ю., Максимов В.В., Нуднер И.С. и др.** Численное и экспериментальное исследования воздействия уединенной волны на частично проницаемые сооружения // Тр. X Всерос. конф. “Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики”. СПб.: Наука, 2010. С. 193–196.  
**Kamyinin, E.Yu., Maximov, V.V., Nudner, I.S. et al.** Numerical and experimental study of a solitary wave interaction with partially permeable obstacles // Proc. of the 10th All-Russ. Conf. “Advanced Technologies of the Hydroacoustics and Hydrophysics”. St.-Petersburg: Nauka, 2010. P. 193–196. (In Russ.)
- [46] **Камынин Е.Ю., Максимов В.В., Нуднер И.С. и др.** Взаимодействие поверхностных волн с частично заглубленным экраном // Тр. Междунар. конф. “Математические и информационные технологии, МИТ-2011”. Белград, 2012. С. 180–185.  
**Kamyinin, E.Yu., Maximov, V.V., Nudner, I.S. et al.** Interaction of surface waves with a partially submerged screen // Zbornic Radova Konferencije MIT 2011. Beograd, 2012. P. 180–185. (In Russ.)
- [47] **Нуднер И.С., Семенов К.К.** Волновое давление на подводный уступ в составе морского гидротехнического сооружения // Сб. тр. XXV Междунар. науч. конф. “Математические методы в технике и технологиях — ММТТ-25”. 2012. Т. 9. С. 108–110.  
**Nudner, I.S., Semenov, K.K.** Wave pressure on the underwater step as part of the marine hydrotechnical structure // Proc. of the XXV Intern. Sci. Conf. on Mathematical Methods in Technics and Technologies — ММТТ-25. 2012. Vol. 9. P. 108–110. (In Russ.)

- [48] **Елецкий С.В., Майоров Ю.Б., Максимов В.В. и др.** Моделирование генерации поверхностных волн перемещением фрагмента дна по береговому склону // Вычисл. технологии. 2004. Т. 9, специальный выпуск, ч. 2. С. 194–206.  
**Eletskij, S.V., Maiorov, Yu.B., Maximov, V.V. et al.** Simulation of surface waves generation by a moving part of the bottom down the coastal slope // Comput. Technologies. 2004. Vol. 9, special issue, pt 2. P. 194–206. (In Russ.)
- [49] **Chubarov, L.B., Eletskij, S.V., Fedotova, Z.I., Khakimzyanov, G.S.** Simulation of surface waves generation by an underwater landslide // Russ. J. of Numer. Analysis and Math. Modelling. 2005. Vol. 20, No. 5. P. 425–437.
- [50] **Shokin, Yu.I., Fedotova, Z.I., Khakimzyanov, G.S. et al.** Modelling surfaces waves of generated by a moving landslide with allowance for vertical flow structure // Russ. J. of Numer. Analysis and Math. Modelling. 2007. Vol. 22, No. 1. P. 63–85.
- [51] **Афанасьев К.Е., Максимов В.В., Нуднер И.С. и др.** Численное моделирование работы опытового волнопродуктора одиночных волн // Тр. XI Всерос. конф. “Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики”. СПб.: Наука, 2012. С. 201–203.  
**Afanasiev, K.E., Maximov, V.V., Nudner, I.S. et al.** Numerical modeling of the experimental wavemaker of a single wave // Proc. of the 11th All-Russ. Conf. “Advanced Technologies of the Hydroacoustics and Hydrophysics”. St.-Petersburg: Nauka, 2012. P. 201–203. (In Russ.)

*Поступила в редакцию 12 декабря 2018 г.*

### **Numerical model of the hydrowave laboratory for studying the interaction of sea waves with hydrotechnical structures**

NUDNER, IGOR S.<sup>1,2</sup>, SEMENOV, KONSTANTIN K.<sup>1,3</sup>, LEBEDEV, VLADIMIR V.<sup>1</sup>,  
 KHAKIMZYANOV, GAYAZ S.<sup>4,\*</sup>, ZAKHAROV, YURIY N.<sup>4,5</sup>

<sup>1</sup>23 State Marine Design Institute — Branch of “31 State Design Institute of Special Construction”, St.-Petersburg, 191167, Russia

<sup>2</sup>Baltic State Technical University “Voenmekh”, St.-Petersburg, 190005, Russia

<sup>3</sup>Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St.-Petersburg, 195251, Russia

<sup>4</sup>Institute of Computational Technologies SB RAS, Novosibirsk, 630090, Russia

<sup>5</sup>Kemerovo State University, Kemerovo, 650000, Russia

\*Corresponding author: Khakimzyanov, Gayaz S., e-mail: khak@ict.nsc.ru

In the design of hydraulic structures and facilities of the coastal infrastructure, one of the main methods of confirming the claimed characteristics of the constructed facilities is the implementation of physical modelling in special hydrowave laboratories. However, the use of physical modelling as a tool for determining the most rational characteristics and parameters of hydraulic structures is very limited due to the high cost and, as a rule, the high complexity of the relevant studies. For this reason, it is virtually impossible to resort to this type of study in situations where a significant number of different project options need to be sorted out. The way out of the situation is the use of numerical modelling methods that allow you to choose the most suitable option. In fact, there is a need for a numerical model of the hydrowave laboratory, which allows abandoning the physical modelling in appropriate situations and replacing it with a numerical one. In this case, it will be possible to achieve important advantages:

to reduce the cost and speed up the process of choosing the rational parameters of the design solution in hydraulic engineering, to give sufficient justification for the decision before its final verification by physical modelling. Thus, the combination of numerical studies of the proposed design solutions and physical modelling of the final result in order to confirm compliance with the requirements meets the needs of design studies in hydraulic engineering.

In this paper, we consider the issues related to the construction and the domain of the numerical model of the hydrowave laboratory, as a tool that allows in some situations to abandon the physical modelling and replace it with a numerical one. Mathematical models and numerical algorithms that can be included in the numerical laboratory and used for numerical simulation of the processes of generation of surface waves, their propagation and interaction with coastal and marine structures are presented. The requirements are given for the software of the numerical model of the hydrowave laboratory, the implementation of which will ensure the effective use of this tool by hydraulic engineers in the design of hydraulic structures. Examples of successful use of mathematical technology to improve the efficiency of laboratory research are given.

*Keywords:* hydrotechnical structure, wave flume, wave basin, wavemaker, physical modelling, mathematical model, numerical algorithm.

*Cite:* Nudner, I.S., Semenov, K.K., Lebedev, V.V., Khakimzyanov, G.S., Zakharov, Yu.N. Numerical model of the hydrowave laboratory for studying the interaction of sea waves with hydrotechnical structures // Computational Technologies. 2019. Vol. 24, No. 1. P. 86–105. DOI: 10.25743/ICT.2019.24.1.007. (In Russ.)

**Acknowledgements.** The study was supported by the Program of Presidium of RAS No. 27 “Fundamental problems of solving sophisticated practical problems using supercomputers”.

*Received 12 December 2018*