

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ  
МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРАНСФОРМАЦИИ ОПОЛЗНЕЙ ВБЛИЗИ  
ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ**

**Е. Л. Авербух\*, О. Е. Хвостова\*\*, И. А. Крюков\*, А. А. Куркин\*\***

*\* Нижегородский Государственный Технический Университет им. Р.Е. Алексеева*

*\*\* Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»  
(г. Нижний Новгород)*

**Поступила в редакцию 25.04.2011 г.**

**Аннотация.** В данной работе представлена реализация программного комплекса оценки гидродинамических нагрузок на подводные гидротехнические сооружения. В основе численной реализации лежит гидродинамический метод сглаженных частиц на основе системы уравнений Навье-Стокса.

**Ключевые слова:** численный эксперимент, метод сглаженных частиц, отображение результатов, меташары, оползневые процессы.

**Annotation.** In the present paper a program is implemented to evaluate the hydrodynamic loads on the underwater hydro technical constructions, which was modeled using Navier-Stokes equations. As a basis smoothed particle hydrodynamic method is used.

**Keywords:** numerical experiment, smoothed particle hydrodynamics, simulation results representation, metaballs, landslides.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Интенсивное строительство гидротехнических сооружений (подводные трубопроводы, причалы, подводные комплексы и различные платформы для добычи, сбора и транспортировки нефти и газа) потребовало совершенствования методов расчета воздействий внешней среды на такие сооружения.

Вопросам определения напряженно-деформированного состояния гидротехнических конструкций посвящено достаточно большое число отечественных и зарубежных работ [1–4]. Как правило, рассматриваются волновые поля, которые понимаются как суммарные волновые давления на сооружение, возникающих вследствие волнового движения жидкости и дополнительно оползания грунта вблизи опор.

Одной из наиболее часто применяемых конструкций морских технических платформ является конструкция с развитым опорным блоком [4]. Давление грунта на стенки опорного блока представляет большой интерес, поскольку

ку должно учитываться при анализе устойчивости конструкции. Анализ литературы по данной проблеме [4–7] показывает, что в настоящее время нет общепринятой расчетной методики, позволяющей с достаточной степенью надежности судить о достоверности получаемых результатов.

В настоящей работе рассматривается задача оценки изменения давления на боковую поверхность опоры гидротехнического сооружения в случае оползания грунта. Моделирование процесса оползания выполнено с помощью метода сглаженных частиц, использование которого позволяет не только оценить волновые поля и давление на боковую поверхность опоры, но также учесть такие факторы, как тип грунта, трение внутри оползня, тип материала опоры, а также взаимодействие грунта с опорой.

Вначале рассмотрим различные модели, применяемые для описания динамики оползневых процессов, а также причины их возникновения.

Моделирование движения подводного оползня является достаточно разработанной, но при этом трудной задачей со своими особенностями.

---

© Авербух Е. Л., Хвостова О. Е., Крюков И. А., Куркин А. А., 2011

Большинство подводных оползней возникает вдоль склона и различается большим числом параметров: начальная глубина, тип склона, длина, толщина и др. [8–9].

Для моделирования схода оползня чаще всего используется математическая модель теории мелкой воды [10] или система уравнений Навье-Стокса [11]. Оползень существенно изменяется во время его перемещения, вызывая тем самым изменение генерируемых волн [8]. В этом состоит основная трудность математического моделирования оползневых процессов. Важным моментом в описании таких явлений является описание момента входа источника в воду [12–13]. Важным параметром, который более всего влияет на высоту генерируемой волны, является длина описываемого потока [13].

Подводные оползни происходят по разным причинам: из-за перегрузки склонов вследствие накопления осадков, а также резких изменений атмосферного давления, сильного штормового волнения и деятельности человека (взрывы и т.д.) [14].

В настоящей работе рассматривается оползание грунта, сопровождающееся сильно-нелинейной деформацией в процессе движения. Поэтому при моделировании целесообразным становится использование бессеточных методов, например, метода сглаженных частиц (SPH, Smoothed Particle Hydrodynamics) [15]. Визуализация деформируемых поверхностей является также интересной и сложной задачей, так как она нацелена на представление бессеточных объектов: частиц жидкости.

### МЕТОД СГЛАЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Основные уравнения механики сплошной среды, включающие в себя уравнения Навье-Стокса и уравнение неразрывности имеют следующий вид:

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{F} - \frac{\nabla P}{\rho} + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \mathbf{v}, \quad (1)$$

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \nabla \mathbf{v}, \quad (2)$$

где  $\mathbf{v}$  – скорость,  $\mathbf{F}$  – вектор объемных сил,  $P$  и  $\rho$  – давление и плотность жидкости соответственно,  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости.

По своей сути метод сглаженных частиц является интерполяционным методом, который

позволяет представить любую функцию  $A$  в виде конечной суммой по соседним частицам к аппроксимируемой [15]:

$$A(r) = \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{\rho_i} A_i W(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i, h), \quad (3)$$

где  $A$  – искомая функция,  $\mathbf{r}$  – радиус-вектор,  $W$  – функция ядра,  $h$  – носитель ядра, она определяет радиус взаимодействия между частицами и называется сглаживающей длиной, где  $m$  – масса, индекс соответствует  $i$ -й частице, а  $n$  – количество соседних частиц для  $i$ -й.

Изначально, метод сглаженных частиц использовался для моделирования движения сжимаемых сред. Для моделирования почти несжимаемых сред необходимо подобрать подходящее уравнение состояния [16]:

$$P_i = k(\rho_i - \rho_0), \quad (4)$$

где  $P$  – давление,  $k$  – коэффициент,  $\rho_0$  – плотность покоящейся жидкости.

На твердой границе характеристики граничных частиц вычисляются исходя из их значений в частицах подвижной среды (частицы Морриса) [17]. Это позволяет решить проблему несимметричности функции ядра. На свободной поверхности действует дополнительная сила – сила поверхностного напряжения, которая способствует симметризации сил взаимного притяжения частиц жидкости друг к другу, и действует по направлению нормали внутрь поверхности жидкости. Расчет ускорения каждой частицы производится с помощью метода полушагов.

Гидродинамические линейные нагрузки  $P_s$  на опору определяются по найденной площади эпюры бокового волнового давления на твердой границе  $\Gamma$  [17–18]:

$$P_s = \int_{\Gamma} P_w ds, \quad (5)$$

где  $P_w = P - P_0$  – волновое давление,  $P$  – текущее распределение давления,  $P_0$  – начальное распределение давления.

### ВИЗУАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Процесс визуализации данных SPH-моделирования состоит из двух основных этапов: восстановление поверхности и ее визуализация (рендеринг). Основную сложность при этом представляет процесс выявления поверхности, т.к. поверхность среды описывается беспорядочным набором частиц, не имеющих общего уравнения поверхности.

Процесс восстановления поверхности описывается, в основном, с помощью текстур или изоповерхностей. Учитывая специфику метода сглаженных частиц, интересным является использование изоповерхностной техники меташаров для данной цели [19]: обе методики используют гладкие скалярные функции, так называемые сглаживающие ядра для моделирования.

Метод меташаров основан на том, что каждая частица некоторым образом влияет на окружающие точки в пространстве по определенному закону:

$$F(\mathbf{x}) = \sum_k f(\mathbf{x}, m_k). \quad (6)$$

где  $f$  – функция воздействия меташара  $k$  с центром  $m_k$ ,  $\mathbf{x}$  – координата точки. Для каждого меташара задано пороговое значение, или область взаимодействия, и если частицы попадают в область взаимодействия друг друга, то они порождают единую поверхность. Сама поверхность представляет линию уровня  $F(\mathbf{x}) = C$  (рис. 1). Варьируя значения  $C$ , можно получать поверхности разной формы.

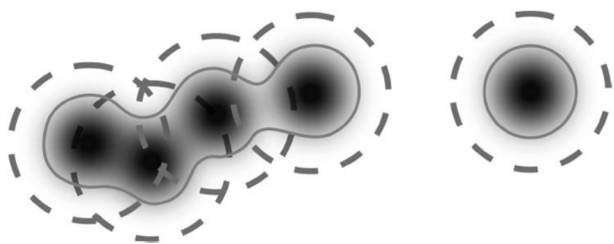


Рис. 1. Система меташаров и изоповерхности: сплошная линия – изоповерхность; пунктирная линия – пороговое значение влияния меташара на пространство

Учитывая, что поверхность представляется в виде пересекающихся сфер, наиболее удобным для визуализации поверхности является метод объемного рендеринга, который позволяет рисовать трехмерное скалярное поле без промежуточного представления его треугольниками, как это делается, например, в алгоритме марширующих кубов. Скалярное поле строится посредством техники меташаров и проецируется на единичный куб. Далее лучи пробрасываются сквозь объем и через равные интервалы делаются замеры поля. К достоинствам метода можно также отнести то, что его легко реализовать на GPU. В данной работе для представления скалярного поля используется 3D-текстура, а пробрасывание лучей вычисляется в пиксельных шейдерах.

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Приведем здесь пример моделирования области размерами 20\*20 м, в центре которой находится бетонная опора. В начальный момент времени оползень вследствие некоторых геодинамических условий становится жидким и начинает движение. Процесс движения оползня в различные моменты времени показан на рис. 2. Давление оползня на опору, рассчитанное по формуле (5), представлено на рис. 3. За 1 секунду движения оползень опускается на 6 м. Картина в области расчета является абсолютно симметричной, что является следствием симметричной постановки задачи.

Сравнение с другими авторами показывает достаточно высокое качественное совпадение полученных результатов [4]. Поэтому можно заключить, что программный код метода SPH реализован верно, и может быть использован

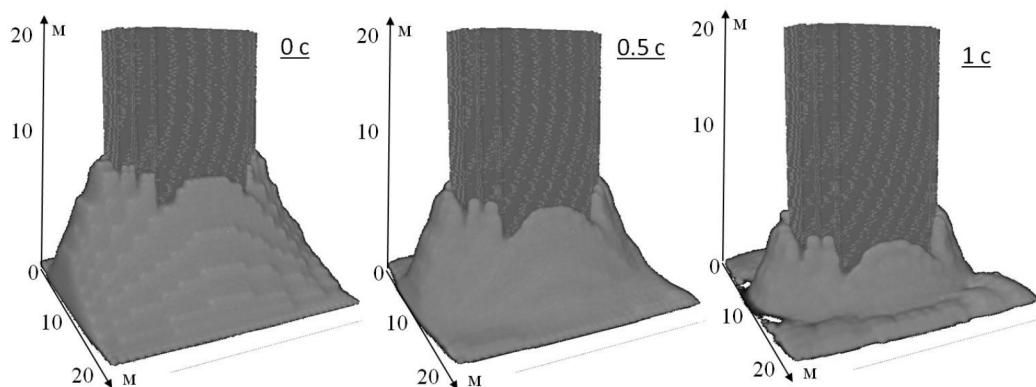


Рис. 2. Движение оползня вблизи опоры в 0, 0.5 и 1 секунду

для оценки влияния оползневых процессов на подводные гидротехнические сооружения в дальнейших исследованиях.

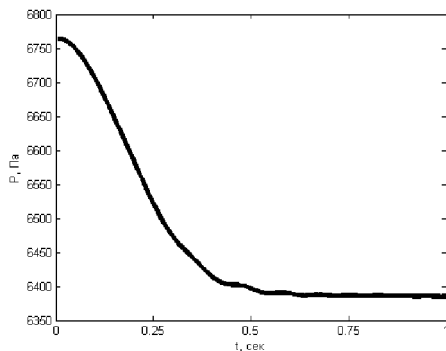


Рис. 3. Расчетное давление на бетонную опору при движении оползня

## ВЫВОДЫ

На представленных в данной работе задачах в трехмерной постановке могут быть выявлены основные достоинства и возможности метода SPH. В связи с тем, что сплошная среда моделируется лагранжевыми частицами можно наблюдать высокую степень физичности метода. Вследствие того, что частицы допускают произвольную связность между собой, SPH позволяет рассчитывать задачи с большими деформациями расчетной области и разрывами течений, где моделирование традиционными сеточными методами становится невозможным. Проведенные исследования показали возможность применимости метода для рассматриваемого круга задач.

Для визуализации расчетов нам важна физическая интерпретация результатов моделирования, визуализация и расчеты в реальном времени для нас не критичны. Именно поэтому был выбран метод меташаров и объемного рендеринга для отображения результатов моделирования.

Описываемая программа «Моделирование оползневых процессов в местах прокладки нефтяных и газовых трубопроводов» была реализована и зарегистрирована в реестре программ для ЭВМ 3 февраля 2011 года (свидетельство о государственной регистрации № 2011611124). Дополнительно реализован графический пользовательский интерфейс, позволяющий вводить исходные данные моделирования (данные оползня, конструкции, батиметрия дна).

Представленные результаты поисковой научно-исследовательской работы получены в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, а также при поддержке грантов Президента РФ для молодых российских ученых – докторов наук (МД-99.2010.5) и РФФИ 10 05 00199а.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Horikawa K.* Nearshore dynamics and coastal processes / K. Horikawa. – Tokyo: University of Tokyo Press, 1988. – 297 p.
2. *Халфин И. Ш.* Воздействие волн на морские нефтегазопромисловые сооружения / И. Ш. Халфин. – М.: Недра, 1990. – 310 с.: ил.
3. *Миронов М. Е.* Нелинейные волны и их воздействие на плоские стенки / М. Е. Миронов. – СПб.: Изд-во ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 2001.
4. *Беллендир Е. Н.* Местные размывы у платформ для обустройства нефтегазовых месторождений при совместном действии волн и течений / Е. Н. Беллендир, Б. В. Беляев, М. Е. Миронов // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 2003. Т.242. С. 208–214.
5. *Сахновский А. М.* Определение давления несвязного грунта на жесткие несмещаемые подпорные стены / А. М. Сахновский // Матер. конф. и совещаний по гидротехнике. – Л.: Энергоатомиздат. 1980. С. 112–116.
6. *Сахновский А. М.* Расчет давления несвязного грунта на подпорные стены, опертые по верху / А. М. Сахновский // Изв. ВУЗов. Строительство и архитектура. 1983. № 11. С. 24–28.
7. *Зарецкий Ю. К.* Приближенное решение задачи о давлении несвязного грунта на смещаемую подпорную стенку / Ю. К. Зарецкий // Известия ВУЗов. Строительство и архитектура, 1983. № 11. С. 28–37.
8. *Мазова Р. Х.* Цунами, порожденные подводными оползнями / Р. Х. Мазова // Известия АИН РФ. Прикладная математика и механика. 2003. Т. 4. С. 117–125.
9. *Lynett P.* A numerical study of the runup generated by three-dimensional landslides / P. Lynett, P L.-F. Liu // Journal of Geophysical Research. 2004.
10. *Зеркаль С. В.* Моделирование движения потоков различной природы по наклонной поверхности методом частиц / С. В. Зеркаль, Е. В. Захаров, С. В. Богомолов // Вісник Харківського національного університету Серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління» № 2, 2003.
11. *Liu P. L.-F.* Runup and rundown generated by three-dimensional sliding masses / P. L.-F. Liu, T.-R. Wu, F. Raichlen, C. Synolakis, J. Borrero // Journal of Fluid Mechanics, 2005, Vol. 536. PP.107–144.

12. *Maciel G.* Water waves generated by landslide into a reservoir. Physical and numerical analysis / G. Maciel, M. Naaim // Int. Conf. HAZARDS'91, Perugia, Italy, 1991. Symp. Mater. P.120.

13. *Heinrich P.* Simulation of water waves generated by a potential debris avalanche in Montserrat, Lesser Antibes / P. Heinrich [et al.] // Geophysical Research Letters. 1998. Vol. 25. №19. P. 3697–3700.

14. *Хвостова О. Е.* Оценка запаса устойчивости склонов береговой линии Горьковского водохранилища / О. Е. Хвостова // Труды Нижегородского государственного технического университета им. П. Е. Алексеева, 2010. № 4(83). С. 23–29.

15. *Monaghan J. J.* Smoothed Particle Hydrodynamics / J. J. Monaghan // Annual Reviews Astronomy. Astrophysics. 1992. №30. P. 543–574.

**Авербух Елена Леонидовна** – Нижегородский Государственный Технический Университет им. П. Е. Алексеева, кафедра «Прикладная математика»; магистрант, инженер; адрес: г. Н. Новгород, ул. Минина, 24; телефон: (831) 436 04 89, e-mail: Averbukh.lena@gmail.com.

**Хвостова Ольга Евгеньевна** – Нижегородский Государственный Технический Университет им. П. Е. Алексеева, кафедра «Прикладная математика», Государственный Университет – Высшая Школа Экономики (Нижегородский филиал); аспирант, инженер; адрес: г. Н. Новгород, ул. Минина, 24; телефон: (831) 436-04-89; 8-920-016-9646, e-mail: olga.khvostova@gmail.com.

**Крюков Илья Александрович** – Нижегородский Государственный Технический Университет им. П.Е. Алексеева, кафедра «Прикладная математика»; студент, техник; адрес: г. Н. Новгород, ул. Минина, 24; телефон: (831) 436-04-89; e-mail: ilyakrukov@gmail.com.

**Куркин Андрей Александрович** – Нижегородский Государственный Технический Университет им. П. Е. Алексеева, кафедра «Прикладная математика», Государственный Университет – Высшая Школа Экономики (Нижегородский филиал); д.ф.-м.н., проф., профессор кафедры «Прикладная математика»; адрес: г. Н. Новгород, ул. Минина, 24; телефон: (831) 436-04-89, e-mail: aakurkin@gmail.com.

16. *Kelager M.* Lagrangian Fluid Dynamics Using Smoothed Particle Hydrodynamics. / M. Kelager. – University of Copenhagen. Denmark, 2006.

17. *Афанасьев К. Е.* Численное моделирование течений жидкости со свободными границами методами SPH и MPS / К. Е. Афанасьев, А. Е. Ильясов, Р. С. Макаручук, А.Ю. Попов // Вычислительные технологии. Институт вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук. Т.11, Специальный выпуск, 2006.

18. *Авербух Е. Л.* Моделирование оползневых процессов вблизи опор мостов и других подводных конструкций / Е. Л. Авербух, А. А. Куркин, О. Е. Хвостова // Труды Математического центра имени Н. И. Лобачевского; Казан. матем. об-во. – Казань : 2010, Т.40. С. 10–17.

19. *Blinn J. F.* A Generalization of Algebraic Surface Drawing / J. F. Blinn // ACM Transactions on Graphics. – 1982. P. 235–256.

**Averbukh Elena Leonidovna:** Nizhny Novgorod state technical university, Applied Mathematics Department, master student, N. Novgorod, Minina St., 24, phone number (831) 436-04-89, e-mail: Averbukh.lena@gmail.com.

**Khvostova Olga Evgenjevna:** Nizhny Novgorod state technical university, Applied Mathematics Department, National Research University Higher School of Economics (Nizhny Novgorod), PhD student, N. Novgorod, Minina St., 24, phone number (831) 436-04-89; 8-920-016-9646, e-mail: olga.khvostova@gmail.com.

**Krukov Ilya Aleksandrovich:** Nizhny Novgorod state technical university, Applied Mathematics Department, student, N. Novgorod, Minina St., 24, phone number (831) 436-04-89; e-mail: ilyakrukov@gmail.com.

**Kurkin Andrey Aleksandrovich:** Nizhny Novgorod state technical university, Applied Mathematics Department, National Research University Higher School of Economics (Nizhny Novgorod), prof., Dr.; N. Novgorod, Minina St., 24, phone number (831) 436-04-89; e-mail: aakurkin@gmail.com.