Many methods have been developed in the latest decades and one common practice is decline curve analysis. Prediction of future production of petroleum wells is important for cost-effective operations of the petroleum industry. This work presents a comparative analysis of methods used to predict the performance of Shuanghe oilfield, China. Using decline curve analysis including three different methods: Arps empirical methods, LL-model and simplified model and the new simplified model, LL-Model, to crosscheck Arps exponential decline model prediction results. The results showed by the comparative analysis of predictions calculated proved LL-model to be the best predictor for Shuanghe oilfield since it takes into account more parameters than the old models used in this work. However, the subsurface information or parameters of the reservoir used in LL-model may not be available every time, therefore Arps models may apply as defined. In Shuanghe oilfield calculated average geological reserves N was estimated at 9449.41×10^4 tons, the average recoverable reserves N_R were estimated to 4274.61×10^4 tons while the water cut was 97% and the water cut predicted by LL-model was 96.7%; not far from water flooding curves value. The exponential decline model showed recoverable reserves N_R estimated around 4685.88×10^4 tons of oil while the decline phase of total development was estimated around 34 years which means that if the actual production conditions remain unchanged, Shuanghe oilfield would continue producing for another 25 years from 2008.

Key words: Shuanghe oilfield/ Oil production prediction/ decline curve

ДИНАМИКА ЗАТОПЛЕНИЯ ТЕРРИТОРИИ ВОЛГО-АХТУБИНСКОЙ ПОЙМЫ ВСЛЕДСТВИЕ ПРОРЫВА ПЛОТИНЫ ВОЛЖСКОЙ ГЭС НА ОСНОВЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Т.А. Дьяконова, Е.О. Агафонникова, А.В. Хоперсков, С.С. Храпов
Волгоградский государственный университет
г. Волгоград, Россия, e-mail: infomod@volsu.ru

THE DYNAMICS OF FLOODING IN THE VOLGA-AKHTUBA FLOODPLAIN BECAUSE OF THE VOLZHSKY HYDROELECTRIC DAM BREAK ON THE BASIS OF THE HYDRODYNAMIC MODELING

T.A. Dyakonova, E.A. Agafonnikova, A.V. Khoperskov, S.S. Khrapov
Volgograd state university
Volgograd, Russian Federation, e-mail: infomod@volsu.ru

Abstract. *The potential problem Volzhsky hydroelectric dam break is considered. A numerical model based on cSPH-TVD method using parallel technology was build. Numerical calculations are carried for the dynamics of development and consequences of flooding in the Volga-Akhtuba floodplain.*

Введение

Методы математического моделирования динамики поверхностных вод в приближении мелкой воды позволяют решать широкий круг задач, связанный с прогнозом и управлением гидрологического режима на заданной территории с учетом разливов рек и озер [Воеводин, 2009], осадков [Кивва, 2001], взаимодействия руслового и пойменного потоков [Егоров, 2009], аварийных ситуаций на гидросооружениях [Еремин, 2006], возникновением и динамикой цунами [Шокин, 1989], формированием погоды вблизи крупных водоемов, морскими [Чикин, 2001] и океаническими движениями [Педлоски, 1984].

Плотины на реках представляют собой потенциальную угрозу территориям, расположенным вниз по течению, поэтому задача прогноза последствий затопления в случае чрезвычайных (аварийных) ситуаций на гидросооружениях является актуальной и жизненно необходимой при разработке планов застройки и эвакуации населения при возникновении ЧС.

В данной работе описана математическая модель с учетом различных физических факторов и ее численная реализация. Представлены результаты моделирования динамики затопления территории вследствие аварии плотине Волжской ГЭС.

Математическая модель

Динамика поверхностных вод данной задачи описывается в рамках модели мелкой воды (рисунок 1), поэтому при моделировании используются уравнения Сен-Венана [Еремин, 2006], которые получаются

после усреднения исходных трехмерных уравнений гидродинамики по вертикальной координате. Для искомых величин $H(x, y, t)$, $u_x(x, y, t)$, $u_y(x, y, t)$ имеем:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial H u_x}{\partial x} + \frac{\partial H u_y}{\partial y} = q, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + f_x, \quad (2)$$

$$\frac{\partial u_y}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + f_y, \quad (3)$$

где H – глубина жидкости, u_x, u_y – горизонтальные компоненты вектора скорости $\mathbf{u}$, усредненные по вертикальной координате, g – ускорение свободного падения, $\eta = H + b$ – уровень свободной поверхности жидкости, $b(x, y)$ определяет рельеф местности, f_x, f_y – горизонтальные компоненты вектора $\mathbf{f}$ внешних и внутренних сил, действующих на слой жидкости [Храпов, 2010]. Для вектора $\mathbf{f}$ имеем:

$$\mathbf{f} = \mathbf{f}^{frict} + \mathbf{f}^{Cor} + \mathbf{f}^{wind} + \mathbf{f}^{visc}, \quad (4)$$

здесь $\mathbf{f}^{frict} = -\frac{\lambda}{2} \mathbf{u} |\mathbf{u}|$ – сила придонного трения, $\lambda = \frac{2g n_M^2}{H^{4/3}}$ – коэффициент гидравлического сопротивления, n_M – шероховатость по Маннингу ($n_M \approx 0.01 \div 0.1$) [Khrapov, 2013], $\mathbf{f}^{Cor} = 2[\mathbf{u} \times \mathbf{\Omega}]$ – сила Кориолиса, $\mathbf{\Omega}$ – угловая скорость вращения Земли, $\mathbf{f}^{wind} = C_a \frac{\rho_a}{\rho H} (\mathbf{w} - \mathbf{u}) |\mathbf{w} - \mathbf{u}|$ – сила ветра, C_a – параметр характеризующий состояние водной поверхности, ρ_a и ρ – плотность воздуха и воды соответственно, $\mathbf{w}$ – вектор скорости ветра в горизонтальном направлении, $\mathbf{f}^{visc} = \nu \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} \right)$ – сила внутреннего (вязкого) трения, ν – коэффициент кинематической турбулентной вязкости ($\nu \leq 100 \text{ м}^2/\text{с}$).

Рисунок 1 – Схема, поясняющая обозначения математической модели

В уравнении непрерывности для тонкого слоя (1) присутствует параметр q , который характеризует скорость притока/оттока воды за счет действующих источников/стоков. Для q в общем случае имеем:

$$q = q^{(s)} + q^{(r)} - q^{(inf)} - q^{(ev)}, \quad (5)$$

где $q^{(s)} = \frac{\partial Q}{\partial S}$ – приток воды через плотину, $Q(t)$ – гидрограф пуща или зависимость скорости сброса воды ($\text{м}^3/\text{с}$) от времени [Писарев, 2013], S – площадь источника сброса, $q^{(r)}(t)$ – приток воды,

обусловленный осадками, $q^{(inf)}(x, y, t)$ и $q^{(ev)}(t)$ – отток воды за счет инфильтрации в почву и испарения соответственно. Указанные источники/стоки зависят от температуры воздуха, температуры воды, влажности воздуха, облачности, глубины промерзания почвы, насыщенности влагой грунта и его температуры.

В данной работе рассматривается нелинейная модель инфильтрации воды в почву, которая более адекватно моделирует процесс впитывания воды [Храпов, 2012]. В предлагаемой модели величина $q^{(inf)}$, входящая в соотношение (5), определяется следующим образом

$$\begin{cases} q^{(inf)} = q_*^{(inf)} (1 - \alpha) \frac{H}{H_*} \\ \frac{\partial \alpha}{\partial t} = \frac{q^{(inf)}}{\psi H_l} - \frac{\alpha}{\tau_l} \end{cases}, \quad (6)$$

здесь $q_*^{(inf)}$ – скорость впитывания воды толщиной слоя H_* в сухую почву, $\alpha = V_w/V_l$ – коэффициент влагонасыщенности почвы, V_w – объем воды содержащийся в почвенном покрове с объемом V_l , ψ – пористость почвы, τ_l – характерное время осушения почвы за счет испарения и инфильтрации воды в подпочвенный слой с малой пористостью (глина).

Численная схема

Численное решение системы (1) – (3) строится на декартовой сетке с числом ячеек $N_x \times N_y$. Размер ячейки $\Delta x \times \Delta y$ определяет погрешность расчета и выбирается исходя из качества рельефа $b(x, y)$, которую будем называть также функцией рельефа. Характерной особенностью рассматриваемой задачи является сложный характер рельефа, имеющий многочисленные нерегулярные и даже разрывные участки. Это предъявляет особые требования к численным алгоритмам интегрирования уравнений мелкой воды.

Основу алгоритма образует оригинальный численный метод, основанный на совместном использовании TVD- и SPH-подходов [Храпов, 2011], важной особенностью которого является устойчивый сквозной счет для нестационарной границы типа «вода – сухое дно». Реализованный численный алгоритм обеспечивает второй порядок точности интегрирования по времени и второй порядок точности по пространственным координатам. Численная схема является консервативной и хорошо сбалансированной [Храпов, 2011].

Оптимизация

В рассматриваемой задаче моделирование проводится на протяженной территории со сложной структурой, где области, занятые водой занимают небольшую часть. Для повышения эффективности вычислений на таких участках целесообразным является использование иерархической системы пространственных сеток разных масштабов. Такой подход последовательно описывает динамику жидкости от мелких масштабов до наиболее крупных с неравномерно распределенными источниками (рисунки 2).

Рисунок 2 – Иерархическая система сеток разных масштабов

Параллельные технологии

Ключевым моментом в моделировании и прогнозировании ЧС является своевременное получение информации для дальнейших действий по предотвращению или устранению последствий. По этой причине в компьютерном моделировании подобных задач необходимо использовать параллельные технологии для увеличения скорости вычислений. Наиболее перспективная в этой области – технология CUDA, позволяющая проводить вычисления на графических процессорах ускорителей GeForce.

Использование подхода иерархической системы сеток (ИСС), описанного выше, хорошо адаптируется под вариант программы для GPU, поскольку в соответствии с архитектурой CUDA выполнение вычислительных ядер организовано как сеть потоковых блоков (рисунок 3), которые являются аналогом блоков ИСС.

Рисунок 3 – Иерархия нитей на GPU

В настоящее время все большую популярность набирают гетерогенные вычислительные системы, которые состоят из многоядерных процессоров и массивно-параллельных ускорителей. Использование таких высокопроизводительных систем позволяет моделировать сложные физические процессы, которые

требуют больших затрат ресурсов. Поэтому разработки приложений на таких системах используются схемы, основанные на сочетании различных параллельных технологий. Для суперкомпьютеров с различным числом GPU (количество графических ускорителей равно M) применяется двухуровневая параллельная модель OpenMP-CUDA, которая сочетает в себе принципиально разные типы параллелизма (рисунок 4). Поскольку при загрузке GPU в кластере используется отдельный поток, для таких машин удобно использовать технологию OpenMP совместно с CUDA. Для обмена данными между различными GPU без копирования на CPU используется доступ к памяти Direct Access, который влияет на повышение производительности.

Рисунок 4 - Гибридная схема распараллеливания OpenMP-CUDA

Рисунок 5 - Гибридная схема распараллеливания MPI-OpenMP-CUDA

Для распараллеливания программ на гетерогенных системах, содержащих несколько CPU и GPU используется трехуровневая модель, представленная на рисунке 5, которая сочетает в себе технологии MPI, OpenMP и CUDA. Применение гибридной схемы существенно ускоряет работу программ.

Численное моделирование прорыва разрушения плотины проводилось на CUDA-версии расчетного модуля, диаграмма деятельности которой представлена на рисунке 6.

Рисунок 6 – диаграмма деятельности расчетного модуля

На диаграмме были использованы следующие обозначения:

- K_1 – расчет гидродинамических сил в момент времени t_n и шага по времени dt ;
- K_2 – расчет интегральных характеристик и положения частиц в момент времени $t_{(n+1/2)}$;
- K_3 – расчет гидродинамических сил в момент времени $t_{(n+1/2)}$;
- K_4 – расчет интегральных характеристик и положения частиц в момент времени $t_{(n+1)}$;
- Kernel 5 – вычисление потоков.

Расчетный модуль может запускаться на вычислительных системах с несколькими GPU с некоторыми изменениями в программе (рисунок 7).

Рисунок 7 – диаграмма деятельности версии OpenMP-CUDA

Диаграмма представлена для вычислительной станции, содержащей 4 графических ускорителя. Обозначения D_1, D_2, D_3, D_4 соответствуют номеру GPU.

Постановка задачи

Волжская ГЭС является одной из крупнейших станций с большой мощностью. Она расположена в нижнем течении р. Волги, а южнее ГЭС находится г. Волгоград. В мире прорыв плотины на гидротехнических сооружениях происходит довольно редко, но все же такая угроза существует. В качестве примера можно привести аварию на Саяно-Шушенской ГЭС и это не единственный случай. Поэтому рассмотрение потенциальной задачи разрушения плотины Волжской ГЭС имеет практический интерес [Еремин, 2006].

Моделирование проводилось на территории Волго-Ахтубинской поймы. Для гидродинамического расчета ключевым моментом является определение функции рельефа $b(x, y)$, соответствующей реальной местности [Воронин, 2012]. Для построения сеточной функции $b_{i,j} = b(x_i, y_j)$ использовались три источника: данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ); лоции дна; собственные данные GPS-измерений.

Основой функции рельефа являются спутниковые данные ASTER и SRTM, способные обеспечить разрешение до 20 м в плоскости Земли и до 1 м по вертикальной координате. Модель речного дна

уточнялась по данным лоций. На основе GPS-измерений были добавлены протоки. На рисунке 8 представлена актуализированная цифровая модель рельефа Волго-Ахтубинской поймы.

Рисунок 8 – Цифровая модель рельефа Волго-Ахтубинской поймы, шкала представлена в метрах

Результаты компьютерного моделирования

Компьютерное моделирование проводилось с использованием программно-аппаратного комплекса «ЭкоГИС», позволяющего рассчитывать динамику поверхностных вод на обширной территории (~500×500 км) с хорошим разрешением (~10–20 м). В состав «ЭкоГИС» входят: гибридная вычислительная станция на базе 4 графических ускорителей NVIDIA® TESLA Fermi C2070 6GB (1792 ядра); специализированная геоинформационная система «EcoGIS-Simulation»; параллельная CUDA-версии расчетного модуля для моделирования динамики поверхностных вод на основе алгоритма cSPH-TVD.

В качестве начального распределения воды и скорости течения выбрано гидрологическое состояние ВАП соответствующее пику паводка 2011 г. [Храпов, 2012]. Выбор такого состояния является наиболее неблагоприятным при возникновении ЧС. Как видно из рисунка, в первые минуты после прорыва формируется волна высотой 7–10 м (гидравлический скачок), которая распространяется сначала со скоростью 70 км/ч по руслу Волги, а затем из-за наличия уклона рельефа в сторону поймы, а также особенностей русла Волги происходит смещение направления основного потока в волне прорыва. Наиболее разрушительной волна прорыва оказывается для пойменного участка в окрестностях Краснослободска и Средней Ахтубы. Глубина воды в момент прохода волны по данному участку составляет в среднем 7 м. Следует отметить, что данная территория наиболее плотно застроена и заселена. После выхода волны затопления на территорию поймы ее скорость заметно снижается и в среднем составляет 10–15 км/ч, а толщина слоя воды на затопленных участках в среднем равна 5 м.

5 мин

10 мин

30 мин

90 мин

180 мин

300 мин

Рисунок 9 – Динамика затопления ВАП при аварийном сбросе (прорыве плотины) в различные моменты времени

Заключение

Полученная компьютерная модель позволяет прогнозировать последствия развития аварийных или катастрофических событий, а также подходит для проведения технической экспертизы гидросооружений. Результаты моделирования могут использоваться различными службами для принятия оперативных решений при чрезвычайных ситуациях.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 13-07-97056 р_поволжье_а, 13-01-97062 р_поволжье_а, 13-05-97065 р_поволжье_а, РГНФ 13-01-12015.

Библиографический список

1. Khrapov S.S., Pisarev A.V., Kobelev I.A., Zhumaliev A.G., Agafonnikova E.O., Losev A.G. and Khoperskov A.V. The Numerical Simulation of Shallow Water: Estimation of the Roughness Coefficient on the Flood Stage // *Advances in Mechanical Engineering*. Volume 2013, Article ID 787016, 11 pages.
2. Воеводин А. Ф., Никифоровская В.С., Виноградова Т.А. Математические модели для прогнозирования процесса распространения волн катастрофических паводков в системах открытых русел и водотоков // *Вестник Санкт-Петербургского университета*, Сер. 7, 2009, вып. 3, С. 139-144.
3. Воронин А.А., Елисеева М.В., Писарев А.В., Хоперсков А.В., Храпов С.С. Имитационные модели динамики поверхностных вод с использованием данных дистанционного зондирования: влияние рельефа местности // *Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии*. 2012, № 3(19), С. 54-62.
4. Егоров В.А. Численные расчеты вязких течений в модельных руслах с поймой // *Математические заметки ЯГУ*, 2009, Т. 15, Вып. 2, С. 92-105.
5. Еремин М.А., Хоперсков А.В. Компьютерная модель прорыва Волжской // *Вестник Волгоградского государственного университета*, Серия 1: Математика. Физика, 2006, Т.10, С. 139–142.
6. Кивва С.Л., Железняк М.И. Численное моделирование двумерного открытого потока с подвижными границами: расчеты стока на водосборе и наката волн цунами на берег // *Вычислительные технологии*, 2001, Т.6, ч.2, С.343–350
7. Педлоски Дж. Геофизическая гидродинамика в 2-х т. М.: Мир, 1984, 806 с.
8. Писарев А.В., Храпов С.С., Агафонникова Е.О., Хоперсков А.В. Численная модель динамики поверхностных вод в русле Волги: оценка коэффициента шероховатости // *Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки*, 2013, N 1, С. 114-130.
9. Хоперсков А.В., Храпов С.С., Писарев А.В., Воронин А.А., Елисеева М.В., Кобелев И.А. Задача управления гидрологическим режимом в эколого-экономической системе «Волжская ГЭС – Волго-Ахтубинская пойма». Ч.1. Моделирование динамики поверхностных вод в период весеннего паводка // *Проблемы управления*, 2012, № 5, С. 18-25.
10. Храпов С.С., Писарев А.В., Воронин А.А., Дьяконова Т.А., Циркова Е.А. Особенности динамики затопления Волго-Ахтубинской поймы в зависимости от режимов испарения и инфильтрации // *Вестник Волгоградского государственного университета*, Серия 1: Математика. Физика, 2012, Т.16. 1, С. 43-47.
11. Храпов С.С., Хоперсков А.В., Еремин М.А. Моделирование динамики поверхностных вод: Монография. – Волгоград: Издательство Волгоградского государственного университета, 2010, 132 с.
12. Храпов С.С., Хоперсков А.В., Кузьмин Н.М., Писарев А.В., Кобелев И.А. Численная схема для моделирования динамики поверхностных вод на основе комбинированного SPH-TVD-подхода // *Вычислительные методы и программирование*. 2011, Т. 12, №1, С. 282-297.
13. Храпов С.С., Хоперсков А.В., Писарев А.В., Кобелев И.А. Геоинформационная система для прогноза сезонных затоплений // *ИнтерКарто-ИнтерГИС 18 : материалы Международной конференции*, Россия, Смоленск, 26-28 июня 2012. — 2012, С. 386-394.
14. Чикин А.Л. Построение и численное исследование 3D модели гидродинамики Азовского моря // *Труды Международной конференции, посвященной 80-летию академика Н.Н. Яненко «Современные проблемы прикладной математики и механики: теория, эксперимент и практика»*. Новосибирск, Академгородок, 24 – 29 июня 2001 года. «Вычислительные технологии», т.6, спецвыпуск, 2001, С.686-692.
15. Шокин Ю.И., Чубаров Л.Б., Марчук Ан.Г., Симонов К.В. Вычислительный эксперимент в проблеме цунами. Новосибирск: Наука, 1989. 168 с.

ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ПАРАМЕТРОВ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ ЦЧР

*С.А. Епринцев, С.А. Куролап, С.В. Шекоян
Воронежский государственный университет
г. Воронеж, Россия E-mail: esa81@mail.ru*

GIS, ENSURING ENVIRONMENTAL SAFETY STUDY PARAMETERS URBANIZED AREAS OF THE CENTRAL BLACK EARTH REGION

*S.A. Eprintsev, S.A. Kurolap, S.V. Shekoyan
Voronezh State University
Voronezh, Russia E-mail: esa81@mail.ru*