

УДК 004.942

Липатов Игорь Викторович¹, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры водных путей и гидротехнических сооружений

e-mail: i_lipatov@mail.ru

Решетников Максим Алексеевич¹, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры водных путей и гидротехнических сооружений

e-mail: serfskiwind@gmail.com

Бандин Денис Алексеевич¹, Аспирант, ассистент кафедры водных путей и гидротехнических сооружений

e-mail: bandindenisl@yandex.ru

¹Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия.

ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И ЕЕ РЕАЛИЗАЦИИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИКИ РЕЧНОГО ПОТОКА В НИЖНЕМ ТЕЧЕНИИ Р. ОКИ

Аннотация. Использование математического моделирования стало неотъемлемой частью проектных работ. Моделирование гидродинамики речных сопряжено со сложной топологией расчетной области дна и решением уравнений Навье-Стокса. Последние в сочетании с проблемой соотношений размеров длины, ширины и глубины ставят дополнительные проблемы на пути практической реализации и получения результата. В частности, строгая аппроксимация расчетной области требует применения равноразмерных расчетных элементов. Обойти эти проблемы позволяют настройки итерационного решателя в сочетании с CAD/CAE вычислительными технологиями.

Ключевые слова: численное моделирование, моделирование речных потоков, граничные условия, генерации расчетной сетки; математические модели.

Большинство рек в России, являющиеся источниками пресной воды, также являются транспортными артериями с активным судоходством. В дополнении к транспортной функции, развитие экономики требует возведения и эксплуатации энергетических и воднотранспортных сооружений. Все эти объекты требуют максимально корректной оценки характера взаимодействия речного потока с окружающей средой и адекватной оценки отклика реки на техногенное воздействие.

Традиционно для ответа на выше озвученные вопросы использовались многолетние наблюдения и русловые съемки интересующих участков реки. Пространственно-временной характер развития руслового процесса позволяет оценить направления и тенденции аккумулятивно - эрозионных процессов динамики русловых потоков. Но, в целом, этот путь имеет чисто экстраполяционный характер. Поэтому при изменении водности года или иных водно-климатических факторов, а также вмешательство в топологию дна, оправдываемость такого прогноза резко падает.

Для решения проектных задач об оценке характера отклика речного потока на внешнее техногенное воздействие, стали применять лабораторный эксперимент. Но специфика моделирования речных потоков поставила вопрос о масштабном факторе. В частности, моделирование даже малых рек по критерию Фруда, требуется использовать геометрический масштаб, который меняет режим движения воды с зоны квадратичной

турбулентности на ламинарный. В результате адекватное воспроизведение аккумулятивно-эрозионных процессов в лаборатории становится практически невозможным.

Тем не менее, практика все настойчивее требует адекватных ответов на вопрос о характере изменения русловых процессов при том или ином техногенном воздействии. В результате на практике стали активно применять достижения вычислительной математики и выполняться математическое моделирование гидродинамики речного потока.

Отправной точкой создания компьютерных математических моделей является решение полной стационарной системы гидродинамических уравнений Навье-Стокса с дополнением их уравнением неразрывности и последующим замыканием $k-\varepsilon$ гипотезой турбулентности /1,2,3,4,5,6/. Для задания граничных условий выделялись четыре специфических области : входное сечение; дно речного участка; свободная поверхность; выходное сечение.

Для создания расчетной сетки использовался файл с опорными точками по геометрической твердотельной CAD модели реки. Практика применения различных алгоритмов для генерации расчетных сеток в границе замкнутого твердого геометрического тела показала, что лучше всего использовать метод “фронтального продвижения”. Его реализация в нашем случае осуществляется в четыре этапа /7,8,9/:

- импорт геометрии и подготовка поверхности;
- создание подповерхностей;
- создание поверхностной сетки;
- создание внутренней объемной расчетной сетки.

Данный алгоритм отлично разбивает расчетную область на кубики или равнобедренные тетраэдры. Но применительно к данной задаче, такой путь неприемлем. Это связано с тем, что у участка длина – 10 км, ширина – 0.8 км и средняя глубина - 5 м. Причем, наиболее важным для анализа является дискретизация расчетной области по глубине. Таким образом, взяв базовый размер для расчетной ячейки в 1 метр, мы получим сетку в несколько десятков миллионов расчетных ячеек. Естественно, обработка такой сетки потребует значительного ресурса. Пока такой ресурс для авторов недоступен.

Единственным выходом из этого ситуации является отступление от жесткого критерия равномерности граней расчетной ячейки. В этом случае, расчетная процедура столкнется с дивергенцией и численной диффузией матрицы координат и, как следствие, конвергенцией решателя.

Как показал анализ специальной литературы, современные алгоритмы включают в себя опции по работе с “плохими” сетками, т.е. сетками, у которых расчетные ячейки далеки от равномерных. Если соотношение размеров расчетных ячеек превосходит М 1:10, то необходимо активировать дополнительные опции предикт-корректора решателя и более тонко подстраивать коэффициент недорелаксации при переходе от одной итерации к другой. Помимо этого, крайне эффективными могут быть внесение корректировок в алгоритм решения сформированных систем уравнений. С одной стороны, это удлинит расчетную процедуру, а, с другой, повысит устойчивость расчетной процедуры. В конечном итоге это позволяет стабилизировать итерационный процесс и довести расчетную процедуру решателя до уровня нужных невязок и получить корректное решение.

На практике этот подход реализуется следующим образом:

- подготовленная и импортированная CAD геометрия внешней поверхности деформируется с учетом масштабных коэффициентов по глубине и ширине реки. В результате расчетная область приобретает менее вытянутые по длине очертания;
- затем реализуются все этапы генерации сетки метода “фронтального продвижения”;
- по завершении генерации расчетной сетки из равномерных расчетных ячеек в “искаженном” пространстве, с помощью обратных пересчетных масштабных коэффициентов возвращают расчетную область в исходное положение.



Такой прием позволил сократить объем расчетной сетки до 0.8 – 1.2 миллиона расчетных ячеек. Несмотря на то, что равномерность расчетных ячеек значительно нарушается, с помощью дополнительных настроек решателя удалось свести итерационный процесс сходимости за приемлемый период времени до приемлемого уровня невязки.

В продолжении расчетной процедуры к сгенерированной сетке прикладываются граничные условия. Развитый постпроцессор вычислительного комплекса позволяет отслеживать и анализировать большой объем параметров в различных областях потока. Для контроля узловых гидродинамических параметров процесса, на модели было выделено ряд характерных сечений и контрольных точек, позволяющих ориентироваться в процессе систематизации и анализа результатов моделирования.

С целью выполнения анализа поведения потока и русловых процессов, из системы были получены следующие данные:

1. Линии тока, входящие в расчетную область через входное сечение и покидающие его через произвольное живое сечение. В дополнение к общей схеме проводилась укрупненная детализировка по характерным участкам речного потока с целью анализа русловых процессов на локальных участках.

2. Векторное отображение кинематической структуры потока как по всей длине участка, так и с локализацией по пяти характерным областям длиной до 0.5 км. При анализе это позволило определиться с размерами циркуляционных зон в потоке и выполнить прогноз русловых деформаций на различных этапах строительства.

3. Скалярное отображения модулей скорости на участке. По аналогии с векторным отображением снимались поля скоростей на всем участке и его локальных частях. Это позволило более детально определить действующие градиенты скоростей в критических областях.

Помимо этого, для анализа русловых процессов при строительстве моста фиксировались скорости потока в критически важных областях и проводилась оценка интенсивности аккумулятивных и эрозионных процессов. Наличие такого развернутого материала позволило на качественно новом уровне выполнить анализ русловых процессов в низовьях реки Ока. В совокупности с многочисленными расчетами вариантов технических решений по возведению моста, это позволило выбрать наиболее перспективный для реализации.

Список литературы:

1. Липатов И.В. Монография «Гидродинамика речных потоков и ее влияние на эксплуатационные параметры судоходных гидротехнических сооружений» - Н.Новгород изд, ВГУВТ с. 106
2. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
3. Launder, B.E., and Spalding, D.B. 1974. 'The numerical computation of turbulent flows', Comp. Meth. in Appl. Mech. and Eng., 3, pp. 269-289.
4. Rodi, W. 1979. 'Influence of buoyancy and rotation on equations for turbulent length scale', Proc. 2nd Symp. on Turbulent Shear Flows.
5. El Tahry, S.H. 1983. 'k- ϵ equation for compressible reciprocating engine flows', AIAA J. Energy, 7, No. 4, pp. 345–353.
6. Schlichting, H. "Boundary Layer Theory". 6th Edition, McGraw-Hill, New York. 1968.
7. H. Jin and R. I. Tanner, "Generation of Unstructured Tetrahedral Meshes by Advancing Front Technique", Int. J. Numer. Methods Eng., 36, 1805-1823 (1993).
8. R. Lohner and P. Parikh, "Generation of Three Dimensional Unstructured Grids by the Advancing-Front Method", Int. J. Numer. Methods Fluids, 8, 1135-1149 (1988)
9. J. Peraire, J. Peiro, L. Formaggia, K. Morgan and O. C. Zienkiewicz, "Finite Element Euler Computations in Three Dimensions", Int J. Numer. Methods Eng., 26, 2135-2159 (1988).



FEATURES OF CREATING A MATHEMATICAL MODEL AND ITS IMPLEMENTATION FOR MODELING THE HYDRODYNAMICS OF A RIVER FLOW IN THE LOWER DISTRICT OF THE OKA R.

Igor V. Lipatov, Maksim A. Reshetnikov, Denis A. Bandin.

Abstract. The development of mathematical modeling has become an integral part of design work. Modeling of the hydrodynamics of rivers is associated with a complex topology of the calculated area of the bottom and the solution of the Navier-Stokes equations. The latter, in combination with the problem of the ratios of the dimensions of length, width and depth, pose additional problems in the way of practical implementation and obtaining results. In particular, a strict approximation of the computational domain requires the use of equal-dimensional computational elements. Iterative solver settings in combination with CAD\CAE computing technologies allow to bypass these problems.

Keywords: numerical simulation, simulation of river flows, boundary conditions, computational grid generation; mathematical models.

