

УДК 556.536:681.3

**МЕТОДИКА КАЛИБРОВКИ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ
МОДЕЛЕЙ РЕК И ВОДОХРАНИЛИЩ**

© 2015 Д.А. Никифоров

Институт водных проблем РАН, Москва

Поступила в редакцию 19.05.2015

При создании компьютерных моделей водных объектов для гидравлических расчетов основное значение имеет адекватность разработанной модели реальному водному объекту. Такая адекватность достигается путем калибровки параметров модели. Описывается суть калибровки как задачи оптимизации, методы и приемы проведения калибровки компьютерных гидравлических моделей водных объектов с использованием программного комплекса HEC-RAS как расчетного инструмента.

Ключевые слова: *река, водохранилище, гидравлическое моделирование, калибровка, программный комплекс*

Гидравлические расчеты рек и водохранилищ в естественных условиях проводятся для прогнозирования их уровня в разные сезоны года в зависимости от потребностей. Гидравлические расчеты проводятся для целей различного характера - организационного, управленческого, инженерного. Планирование режимов работы водохранилищ, уточнение диспетчерских графиков оперативного управления водохранилищами, мониторинг складывающейся водохозяйственной ситуации на водном объекте, прогноз гидрологического режима водных объектов, расчеты пропуска половодий и паводков, определение уровней реки в меженные периоды, работа прирусловых гидротехнических сооружений, имитация уровней и расходов рек и водохранилищ в условиях редких гидрологических явлений и экстремальных ситуаций, - все перечисленное требует проведения гидравлических расчетов водного объекта [1].

Существуют разные программные гидравлические расчетные комплексы, которые получили достаточное широкое распространение, как за рубежом, так и в нашей стране. Самыми распространенными подобными программами являются программа MIKE (датского института гидравлических исследований), HEC-RAS (корпус американских военных инженеров), SOBEK (Голландия), существуют отечественные программы, например, «Волна», разработанная ВНИИ ГОЧС МЧС РФ. Принципиальных отличий в математических методиках и в методике расчетов эти программы не имеют - используются уравнения Шези для установившегося движения воды и система уравнений Сен-Венана для расчета неустановившегося движения на основе построения конечно-разностных схем. Различия этих модельных комплексов заключаются в методах учета различных параметров рек, ввода морфометрической информации, описании гидротехнических сооружений для учета их параметров, методов визуализации результатов

расчета и некоторых других нюансах. Для проведения настоящих исследований используется программный комплекс HEC-RAS (John C. Warner, Gary W. Brunner, Brent C. Wolfe, and Steven S. Piper), предназначенный для проведения гидравлических расчетов рек, а также расчетов режима стока наносов и расчетов гидрохимических параметров водных объектов.

Компьютерной моделью гидравлических расчетов конкретного водного объекта назовем структурированный набор цифровых данных в соответствии с используемым программным комплексом, который закодировано описывает параметры водного объекта с его особенностями и характеристиками решаемой гидравлической задачи. Следует различать базовую геометрическую модель водного объекта, которая содержит данные морфометрии водного объекта, и присоединенную к ней гидрологическую модель с данными притоков и сбросов с рассматриваемого водохозяйственного участка. Базовая геометрическая модель водного объекта не меняется при эксплуатации гидравлической модели водного объекта. Гидрологическая модель предназначена для конкретного расчета и может быть изменена, являясь как бы эталоном заполнения гидрологических данных, что позволяет осуществлять многократные гидравлические расчеты рассматриваемого водного объекта с решением задач определенного вида, проводя замену гидрологических данных в разных вариантах [3].

Гидравлический расчет проводится для определенного участка реки, общая структура которого представляет собой на плане граф вида «дерева», состоящий из русла основной реки и притоков. Расчет ведется по створам, створы по нумерации следуют от нижней по течению точки реки или притока против течения воды. Регулируемое водохранилище рассматриваемого гидравлического участка, если оно есть, единственное и плотина его должна совпадать с самым нижним створом №1 участка. Нумерация створов притоков также ведется от нижней точки устья притока против тока воды. Для каждого створа предполагается

*Никифоров Дмитрий Андреевич, младший научный сотрудник Лаборатории управления водными ресурсами.
E-mail: dmitry.nikif@gmail.com*

заполнение топографическими данными морфометрического строения поперечных сечений с выделением русла в обозначенных бровках и пойм [2].

Работа с программой начинается с построения модели рассматриваемого участка реки и ввода базовой информации в используемый программный комплекс HEC-RAS, затем следует ввод гидрологической информации, затем производится начальный расчет, после чего проводится оценка качества полученного по расчету результата. Практически всегда результаты первых гидравлических расчетов выделенного гидравлического участка реки не отвечают требованию адекватности результата, которое проверяется совпадением рассчитанных уровней с фактическими уровнями на репрезентативных створах – постах наблюдений, а также совпадением рассчитанных объемов водохранилища на нормальном подпорном уровне, уровне мертвого объема, и другими у плотины водохранилища с проектными или измеренными объемами водохранилища. Для того чтобы получать адекватные результаты гидравлических расчетов рассматриваемого гидравлического участка реки, необходимо изменить исходные параметры модели – топографию поперечных сечений, расстояния между ними. Корректировка данных исходной компьютерной гидравлической модели с целью получения удовлетворительных результатов гидравлических расчетов и есть калибровка (или идентификация параметров) модели [1-4].

Оценка качества полученных расчетных данных производится по значениям среднего квадратичного отклонения рассчитанных величин от фактических, в данном случае оценка производится для фактического и расчетного уровней воды в водном объекте на репрезентативных гидрометрических постах режимных наблюдений. При получении больших значений отклонений параметров, рассчитанных по модели и фактических данных требуется проводить операцию калибровки

параметров гидравлической модели. В программном комплексе HEC-RAS основным калибровочным параметром является шероховатость русла и поймы. В одномерной гидравлической модели шероховатость русла и поймы является составной характеристикой сопротивления подстилающей поверхности потоку, здесь это сопротивление связывается только с шероховатостью, что позволяет проводить его изменение в широких пределах. Для изменения этого калибровочного параметра, рекомендуется использовать табличные данные шероховатости типов русел водных объектов (М.Ф. Срибный, 1960), что позволяет видеть логику изменения этого параметра. При невозможности достижения приемлемых результатов калибровки при изменении шероховатости, прибегают к изменениям ширины, глубины русла, расстояний между створами водного объекта или всех морфометрических показателей одновременно.

Показатели имеют ограниченную степень изменения и должны быть заключены в определенные рамки возможности их изменения в зависимости от величины водного объекта, освещенности и достоверности имеющейся исходной информации. Все параметры водного объекта, которые можно изменить, имеют пределы изменений, зависящие от величины объекта. Относительные оценки изменения параметров могут быть выражены в формулах (1)-(5) в явном виде и в виде неявной формы эвристических соображений. При любом варианте есть требование минимума отклонений искомым калибровочных параметров от заданных первоначально по расчетным створам морфометрических данных [3]. В ходе практических исследований получена величина изменения ($\leq 5\%$) для каждого параметра в отдельности, которая является оптимальной величиной изменения параметров морфометрии относительно исходных первоначальных данных, что согласуется с аналитическими выводами [4].

$$f_L = \sum_r \sum_{i=2}^{m_r} [(L_{i,i-1} - L_{i,i-1}^*) / L_{i,i-1}^*]^2 \quad (1)$$

$$f_n = \sum_r \sum_{i=1}^{m_r} \left\{ [(n_i^{left} - n_i^{left*}) / n_i^{left*}]^2 + [(n_i^{chanl} - n_i^{chanl*}) / n_i^{chanl*}]^2 + [(n_i^{right} - n_i^{right*}) / n_i^{right*}]^2 \right\} \quad (2)$$

$$f_z = \sum_r \sum_{i=1}^{m_r} \sum_j \left\{ [(l_j - l_j^*) / l_j^*]^2 + [(z_j - z_j^*) / (z_i^{max*} - z_i^{min*})]^2 \right\} \quad (3)$$

$$f_H = \sum_r \sum_{i=1}^{m_r} \left\{ [(H_i^{left} - H_i^{left*}) / H_i^{left*}]^2 + [(H_i^{chanl} - H_i^{chanl*}) / H_i^{chanl*}]^2 + [(H_i^{right} - H_i^{right*}) / H_i^{right*}]^2 \right\} \quad (4)$$

$$f_B = \sum_r \sum_{i=1}^{m_r} \left\{ [(B_i^{left} - B_i^{left*}) / B_i^{left*}]^2 + [(B_i^{chanl} - B_i^{chanl*}) / B_i^{chanl*}]^2 + [(B_i^{right} - B_i^{right*}) / B_i^{right*}]^2 \right\} \quad (5)$$

В условиях направленного течения воды по руслу и пойме требуется одномерный гидравлический расчет установившегося и неустановившегося движения, поэтому в данной статье мы ориентируемся на одномерную гидравлику. Существует необходимость двумерных гидравлических расчетов: в прибрежных районах больших водных объектов, при выходе воды из русла реки на широкое пойменное пространство и в других случаях.

Двумерный расчет более сложен, чем одномерный, требует значительно большего количества информации и времени на подготовку данных [6]. Использование для калибровки морфометрических данных рек и водохранилищ именно одномерных гидравлических расчетов объясняется следующими соображениями. Различие результатов одномерного и двумерного гидравлических расчетов в отношении уровней и средних скоростей потока

при той же заданной морфометрии русла и пойм сравнительно невелика и значительно меньше тех изменений уровней и скоростей течения на створах, которые происходят при изменении морфометрических параметров водного объекта, даже на небольшую величину, сравнимую с точностью определения этих параметров при калибровке гидравлической модели. Поэтому применять двумерные гидравлические расчеты при идентификации (калибровке) параметров гидравлической модели водного объекта, в данном случае, излишне.

Для примера, совершенно иначе проводится калибровка гидрохимических параметров на реке. Здесь по сути определяются параметры распространения загрязняющих веществ в системе водного объекта реки и водохранилища, - места сброса загрязнений, мощности сбросов и пр. Здесь существенное значение имеет двумерное распространение загрязнений; важно определить фарватерное и прибрежные течения, их скорости, массы движущихся в них загрязнений и пр. Поэтому при калибровке загрязнений необходимы двумерные гидравлические расчеты. Калибровка параметров модели проводится до достижения заданных значений отклонений рассчитанных параметров от фактических. Подобные сравнения проводятся для уровней воды – сравнение уровня, полученного после проведения расчета по модели и фактического, заданного в исходной информации, и аналогично для объемов воды в водохранилище. Для каждого водного объекта точность калибровки можно оценить по фактическим данным уровней и объема водохранилища, но можно ориентироваться на общие положения, при которых точность определения уровней – 1 см, точность определения объема водохранилища – 5-7%. Точность рассчитанных уровней можно индивидуально оценить для водного объекта как разницу абсолютных высот водной поверхности между крайними створам участка 1 и n , деленую на число створов – $(Z_1 - Z_2)/n$. Для обеспечения такой точности определения уровней и объемов водохранилища необходимо достижение определенной точности калибруемых параметров. Практика показала, что для достижения удовлетворительной точности соответствия уровней и объемов воды в водохранилище точность калибровки параметров модели для больших рек должна составить от 10 до 30 см, при том, что точность расстояний между створами оценивается от 100 до 300 м. погрешности, глубины – 0,2-0,5 м., ширины русла 3-10 м., значений шероховатости – 0,001.

Общая задача калибровки для этих двух типов величин может быть записана как задача минимизации квадратичной функции, которая вычисляется по программе гидравлических расчетов. Решение задачи проводится путем вычислительных экспериментов. Экспериментами является комплекс гидравлических расчетов функции F , – суммы квадратов относительных отклонений вычисленных уровней от фактических на створах (пунктах наблюдений), плюс сумма относительных

отклонений вычисленных объемов воды в водохранилище от заданных. Первую сумму по уровням можно обозначить как F_z , вторую сумму по объемам через F_v (6, 7):

$$F_z = \sum_{jt} [(Z_{jt}^{расч} - Z_{jt}^{факт}) / \Delta_z]^2 \quad (6)$$

где $\Delta_z = (Z_n^{факт} - Z_1^{факт}) / n$, $Z^{расч}$ – расчетный уровень, полученный после расчета в программном комплексе HEC-RAS; $Z^{расч}$ – фактический уровень воды для репрезентативного створа; Z_1 – уровень воды на первом створе; Z_n – уровень воды на последнем створе, n – число створов.

$$F_v = \sum_{j=0}^m \left[\frac{V_{Z_{УМО}+j \cdot \Delta z}^{расч} + V_{Z_{УМО}+j \cdot \Delta z}^{факт}}{V_{Z_{УМО}+j \cdot \Delta z}^{факт}} \right]^2 \quad (7)$$

где градация уровней $Z = Z_{УМО} + j \cdot \Delta z$ охватывает дискретно диапазон уровней от уровня мертвого объема УМО до форсированного подпорного уровня ФПУ. Шаг изменения по высоте Δz для кривой объемов водохранилища для плотин различной высоты может быть разным, в зависимости от требований к проводимым расчетам и точности информации.

Именно к F_z и F_v (6)-(7) может быть поставлено требование минимума отклонений измененных калибровочных параметров от заданных первоначально по расчетным створам. Оценки близости корректируемых параметров базовой гидравлической модели от исходных данных: расстояния между створами (1), коэффициенты шероховатости (2), также высотные отметки поверхности земли поперечных сечений и расстояния их от левой точки профиля (3), либо глубины H и ширины B профилей русла реки, левой и правой поймы (4), (5). Поскольку по положениям калибровки при корректировке сечения сохраняется его форма, лучше использовать формулы (1), (2), (4) и (5).

Процесс проведения калибровки осуществляется по итерациям, которые проводятся после изменения одного или нескольких калибровочных параметров и являются, фактически, новым прямым расчетом по используемой модели с внесением измененных параметров. Сравнения расчетных и фактических значений уровней и объемов воды проводятся после каждой итерации. Процесс калибровки является весьма трудоемким и затратным по времени, но он необходим. Для обоснования выбора пути калибровки проведены практические исследования, показывающие целесообразность и правомерность выбора изменения калибровочных параметров методами больших или малых шагов (на большие или малые величины за одну итерацию) и последовательное (один параметр за одну итерацию) или совместное (несколько параметров за одну итерацию) изменение калибровочных параметров.

Для этого был создан искусственный водный объект (русло в виде лотка) в программном комплексе НЕС-RAS с базовыми параметрами морфометрии, уклоном и шероховатостью русла, выполняется условие отсутствия подпорных явлений. Для лотка однозначно рассчитаны кривые зависимости $Q=f(H)$ для каждого створа при различных расходах воды. Проведен начальный расчет, который был взят за основу и после изменения морфометрии русла и шероховатости, проводилась калибровка модели до достижения удовлетворительных результатов расчетов по четырем методам:

1) метод последовательного (т.е. по каждому параметру калибровки отдельно) значительного (больше указанной точности расчета 0,2 м, >0,2 м) изменения калибруемых параметров при каждой итерации (метод последовательных больших шагов);

2) методом последовательного незначительного (в пределах указанной точности расчета 0,2 м) изменения калибруемых параметров при каждой итерации (метод последовательных малых шагов);

3) методом совместного (т.е. больше одного параметра калибровки за одну итерацию) значительного изменения калибруемых параметров при каждой итерации (метод совместных больших шагов);

4) методом совместного незначительного изменения калибруемых параметров при каждой итерации.

В результате эксперимента установлено, что наилучшими для расчета методами являются методы изменения калибровочных параметров на незначительные величины – методы малых шагов. Этот путь калибровки является затратным по времени, но обеспечивает соблюдение условий обратной задачи (ее корректность, существование решения и единственность этого решения; в данном исследовании эти три условия являются ключевыми при выборе метода калибровки гидравлической модели, несмотря на то, что решение обратной задачи проводится путем неоднократного решения прямых задач) и приводит к достижению решения за конечное число итераций [5]. Рассматривая методы малых шагов, отдельно стоит обратить внимание на метод совместного изменения калибровочных параметров – здесь наблюдается достаточно быстрое (относительно последовательных изменений) достижение итогового результата, но необходимо понимать, что совместное изменение параметров должно быть контролируемо и не должно выходить за пределы максимальных значений отклонений от исходных данных, применимо к природным водным объектам – т.е. должны соблюдаться условия, описанные формулами (1)-(5).

Для возможности упрощения и ускорения рассматриваемого процесса калибровки гидравлической модели проведены практические исследования, показывающие целесообразность и последовательность изменений различных калибровочных

параметров. Начинать калибровку модели необходимо с калибровки основного калибровочного параметра – шероховатости русла или поймы водного объекта, который дает максимальное изменение показателя среднего квадратичного отклонения, показывающего удовлетворительность калибровки гидравлической модели водного объекта. Если достичь желаемой точности калибровки не удастся только с помощью изменения основного калибровочного параметра (шероховатость), следует начать изменять морфометрические параметры русла водного объекта. При калибровке параметров гидравлической модели для достижения удовлетворительных значений погрешности расчета по уровням, набор калибровочных параметров следующий:

1) Изменение длины участков модели между створами;

2) Изменение ширины створов;

3) Изменение шероховатости русла и поймы водного объекта (одновременно);

4) Изменение высотных отметок продольного участка реки;

5) Изменение формы русла;

6) Изменение шероховатости русла;

7) Изменение коэффициента шероховатости поймы.

Для калибровки параметров гидравлической модели для достижения удовлетворительных значений погрешности расчета по объемам воды в водохранилище набор параметров следующий:

1) Расстояния между створами;

2) Форма русла;

3) Ширина расчетных створов;

4) Высотные отметки.

Разработаны алгоритмы проведения процесса, включающие в себя определенные общие шаги, рекомендации и советы, направленные на ускорение проведения этого этапа создания гидравлической модели водного объекта в рассматриваемом программном комплексе, и его рационализацию в направлении трудозатрат и минимизации повторений действий, приводящих к повторяющимся результатам или к отсутствию изменений. Алгоритмы составлены в двух видах – для машинного счета (является перспективной разработкой для дальнейшего создания автоматизированной программы калибровки гидравлической модели) и эвристический алгоритм, который позволяет, при следовании ему, учесть большинство нюансов и избежать трудностей и зацикливаний или «топтаний» на месте при проведении калибровки, он наиболее адаптирован для проведения процесса калибровки вручную.

Каждый шаг калибровки по каждому виду и параметру должен сопровождаться новым расчетом и сравнением расчетных и исходных величин уровней и объемов воды для получения сведений об уменьшении или увеличении погрешности расчетных данных модели относительно исходной информации. Общий алгоритм калибровки по каждому изменяемому параметру

можно описать принципиальной схемой алгоритма калибровки по итерациям:

1) Вычисление оценок среднеквадратичных отклонений вычисленных и фактических уровней на створах наблюдений, вычисление оценок среднеквадратичных отклонений расчетных объемов водохранилищ при НПУ, УМО и других значениях;

2) Проверка точности приближения к решению, если калибровка признана удовлетворительной, когда расчетные уровни не отличаются от заданных уровней на створах наблюдений более, чем на 20-25 см, и вычисленные объемы водохранилищ отличаются от заданных (фактических или проектных) не более, чем на 5-7%, - переход на конец алгоритма, к пункту 10;

3) Вычисление для каждого створа определенных величин оценок для каждого из варьируемых параметров поперечного сечения (шероховатость, вертикальное положение, ширина русла и поймы) показывающих степень влияния этих изменений на сравнение расчетных и фактических уровней на створах наблюдений, а также влияние изменений этих параметров на сравнение вычисляемых и заданных объемов водохранилищ.

4) Отбор на каждом створе положительных оценок варьируемых параметров поперечного сечения, - т.е. отбор параметров и направлений их корректировок, которые ведут к уменьшению оценочной функции задачи. Такие параметры целесообразно корректировать.

5) Суммирование положительных оценок параметров, целесообразных к корректировкам, для всех групп створов на локальных участках.

6) Определение количественного значения изменения выбранных для вариации параметров; шаг изменения каждого вида параметров определяется в соответствии с принятой точностью калибровки;

7) Корректировка выбранных параметров на выбранных створах, которые характеризуются положительной оценкой калибровки, т.е. целесообразны (предпочтительны) к изменениям, корректировка данных цифровой гидравлической модели участка реки;

8) Проведение гидравлического расчета по откорректированной модели;

9) Переход к пункту 1.

10) Конец алгоритма.

Вся совокупность приемов калибровки цифровой модели реки для гидравлических расчетов формируется в виде списка формализованных вычислительных процедур, как инструмента исследований рассматриваемого участка речной сети и проведения калибровки. Для проведения калибровки любой гидравлической модели водного объекта необходимо использовать не только расчетные характеристики предпочтительности изменения параметров модели, алгоритм расчета, различные прямые методы расчета и оценки точности. Для достижения корректных результатов

калибровки гидравлической модели нужно учитывать целый ряд различных параметров, не поддающихся математической формализации, которые необходимы для корректного отображения процессов, происходящих в водном объекте. Подобные приемы будем называть эвристическими соображениями и действиями при проведении калибровки цифровой гидравлической модели водного объекта. К таким приемам относятся:

1) Наиболее обоснованный для изменения параметр гидравлической модели – шероховатость русла и поймы моделируемого водного объекта, данный параметр имеет огромное влияние (не менее 20% при начальном изменении) на точность и логичность калибровки гидравлической модели водного объекта. Все остальные параметры необходимо калибровать в том случае, если калибровка модели с помощью изменения коэффициентов шероховатости русла и поймы водного объекта не принесли желаемого результата и не привели к достижению удовлетворительной точности расчетов.

2) Учет географического расположения водного объекта с точки зрения топографической классификации рек – горные реки не могут иметь, как правило, корытообразный профиль, равнинные – треугольный.

3) Изменение значений отметок поперечных профилей целесообразно производить в некоторых случаях не на всех профилях, а на тех, изменение которых приводит к максимальному положительному эффекту с точки зрения уменьшения погрешности расчета, это во многом зависит от рельефа местности и площади поперечных сечений рассматриваемых профилей водного объекта.

4) При проведении расчетных экспериментов необходимо учитывать, что при изменении одного параметра стоит проверять величину улучшения расчета, в процентах, после изменения, относительно последнего расчета по предыдущей итерации. Это необходимо, для того, чтобы избежать «топтанья» на месте и не допустить слишком сильного изменения калибруемого параметра.

5) Необходимо постоянно проводить контроль корректности данных после или во время их изменения. Недопустимо создание поперечных профилей русла с отрицательными уклонами или нелогичными формами рельефа, без веских на то оснований. Также недопустимо сильное уменьшение или увеличение коэффициентов шероховатости, не соответствующих предполагаемым реальным условиям (см. М.Ф. Срибный, 1960 «Значения коэффициентов шероховатости для естественных водотоков»).

6) Четкое понимание закономерностей линейного перехода от профиля к профилю позволяет корректно определять места назначения поперечных створов, также огромное значение имеет опыт оператора при назначении поперечных профилей с использованием картографического материала –

необходимо учитывать при расстановке поперечных профилей места разветвлений и многоруканности, руководствоваться стоит рекомендациями, приведенными в работе.

7) Морфометрия поперечных профилей, снятая с различных картографических источников или с космических снимков является, в большинстве случаев, менее точной, чем информация, полученная по источникам непосредственных топографических съемок.

8) Изменение отметок абсолютных высот дна поперечных профилей является задачей трудоемкой и менее обоснованной, чем изменение других морфометрических характеристик, прибегать к подобным изменениям стоит только в редких случаях, когда обоснованное изменение других характеристик не привело к удовлетворительным результатам калибровки цифровой гидравлической модели.

9) Интерполяция уровней на промежуточные створы не является логически обоснованной операцией, кроме случаев, когда имеется кривая зависимости $Q=f(H)$ для створа, где производится интерполяция уровней или есть кривая спада-подпора.

10) Экстраполяция уровней допустима при наличии кривой зависимости $Q=f(H)$ для створа, для которого производится экстраполяция уровней (аналогично пункту 8).

11) Большое значение имеет корректность исходной информации. Важно учитывать периоды гидрологического режима водного объекта. В связи с этим стоит обращать пристальное внимание на кривые подпора уровней воды от плотины ГЭС; при моделировании уровенного режима водного объекта в период половодья или паводков, необходимо помнить о неоднозначности кривой зависимости уровней от расходов воды, особенно в периоды спада-подъема уровней. Исходная информация изначально содержит определенный процент неточности и некорректности, но важно проанализировать и выявить, по мере возможностей, вероятные ошибки, которые могут содержаться в данных. Для этого (самый простой вариант) можно пользоваться визуализацией уровенного режима водного объекта в виде различных графиков. Это помогает выявлять грубые неточности в исходных данных, основываясь на инерционности потока, в зависимости от расходов – невозможен, как правило, резкий рост или спад уровней воды при малом изменении расхода (в подавляющем большинстве случаев), – это хорошо заметно при наличии режимных наблюдений за расходами и уровнями воды. Для выявления подобных ошибок в исходных данных рекомендуется проводить анализ гидрологического режима водного объекта.

Учет вышеописанных эвристических приемов и методов находит отражение в виде эвристического алгоритма калибровки гидравлической модели, который хорошо подходит для проведения процесса калибровки гидравлической

модели вручную и дополняет принципиальный математический алгоритм, который зачастую не может учесть многих выше-описанных методов, относящихся к эвристике. Алгоритм калибровки с учетом эвристических приемов по каждому изменяемому параметру можно описать принципиальной схемой алгоритма калибровки по итерациям:

1. Вычисление оценок среднеквадратичных отклонений вычисленных и фактических уровней на створах наблюдений, вычисление оценок среднеквадратичных отклонений расчетных объемов водохранилищ при НПУ, УМО; вычисления проводятся на специальных формах Excel;

2. Проверка точности приближения к решению, если калибровка признана удовлетворительной (расчетные уровни не отличаются от заданных уровней на створах наблюдений более, чем на 20-25 см., и вычисленные объемы водохранилищ не отличаются от заданных фактических или проектных более, чем на 5-7%) – переход на конец алгоритма, к пункту 8;

3. Перебор в определенном порядке всех заданных створов наблюдений:

3.1 Если на створе наблюдений вычисленные уровни (уровень) превышают заданный фактический, – искать ниже по течению до следующего створа наблюдений створ, на котором возможно расширение площади живого сечения путем увеличения ширины, глубины, уменьшения шероховатости. Подобный поиск следует провести и выше по течению до предыдущего створа наблюдений;

3.2 Если на створе наблюдений вычисленные уровни (уровень) лежат ниже заданного фактического, – искать выше по течению до следующего створа наблюдений створ, на котором возможно сужение площади живого сечения путем уменьшения ширины, глубины, увеличения шероховатости. Подобный поиск следует провести и ниже по течению до предыдущего створа наблюдений;

3.3 Если рассматриваемый створ и створы, на которых намечены корректировки параметров по предыдущим пунктам, лежат в водо-хранилище, то:

3.3.1 Если на рассматриваемой итерации калибровки вычисленный объем водохранилища превышает заданный (фактический или проектный) более, чем на 5-7%, то из всех намеченных к корректировкам параметров рассмотренных в п. 3.1.и.3.2 створах отбираются те параметры, изменения которых уменьшает площадь живого сечения.

3.3.2 Если на рассматриваемой итерации калибровки вычисленный объем водохранилища меньше заданного (фактического или проектного) более, чем на 5-7%, то из всех намеченных к корректировкам параметров рассмотренных в п. 3.1. и 3.2 створах отбираются те параметры, изменения которых увеличивает площадь живого сечения.

3.3.3 Если на рассматриваемой итерации калибровки вычисленный объем водохранилища меньше заданного (фактического или проектного) более, чем на 5-7%, и нет створов, параметры которых следует корректировать для уточнения приближения расчетных и фактических уровней на створах наблюдений, - следует изменять параметры всех створов водохранилища: расширять ширину, увеличивать глубину, увеличивать расстояния между створами водохранилища в пределах погрешности измерений;

3.3.4 Если на рассматриваемой итерации калибровки вычисленный объем водохранилища больше заданного (фактического или проектного) более, чем на 5-7%, и нет створов, параметры которых следует корректировать для уточнения приближения расчетных и фактических уровней на створах наблюдений, следует изменять параметры всех створов водохранилища: уменьшать ширину, уменьшать глубину, уменьшать расстояния между створами водохранилища в пределах погрешности измерений;

Рассмотренные в пп. 3.3.3 и 3.3.4 варианты корректировок параметров целесообразно в полной мере применять к створам, близким к плотине водохранилища, уменьшая эти корректировки пропорционально по длине водохранилища до створов с уровнем дна не выше уровня воды у плотины.

4. Определение количественного значения изменения выбранных для вариации параметров; шаг изменения каждого вида параметров определяется в соответствии с принятой точностью калибровки;

5. Корректировка выбранных параметров на выбранных створах;

6. Проведение гидравлического расчета по откорректированной модели;

7. Переход к пункту 1.

8. Конец алгоритма.

Следование вышеописанным рекомендациям, подходам, приемам и методам позволяет сократить временные затраты на калибровку гидравлической модели водного объекта, проводить

этот процесс с достижением заданной точности и избегать нелогичностей и неадекватности выполняемых операций.

Описанная методика калибровки гидравлических моделей рек и водохранилищ была успешно применена на ряде водных объектов: Саяно-Шушенское, Майнское, Красноярское, Воткинское, Камское, Нижнекамское, Шекнинское и Горьковское водохранилища с участками рек. Калибровка гидравлических моделей водных объектов проведена до получения удовлетворительных результатов расчета. Вышеупомянутые гидравлические модели водных объектов готовы к полноценному использованию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Кюнж, Ж.А. Численные методы в задачах речной гидравлики: практ. применение / Ж.А. Кюнж, Ф.М. Холин, А. Вerveй. – М.: Энергоиздат, 1984. 255 с.
2. Левит-Гуревич, Л.К. Моделирование поперечных сечений по створам рек и проточных водоемов по наблюдаемым зависи-ностям расхода от уровня воды. // Труды конференции «Моделирование устойчивого регионального развития» (г. Нальчик, 7-11 сентября 2009 г.). – Нальчик: КБГУ, 2009. С. 134-141.
3. Левит-Гуревич, Л.К. Математические основы калибровки компьютерных гидравлических моделей рек и водохранилищ. / Л.К. Левит-Гуревич, Д.А. Никифоров // Чистая вода России. Сб. материалов XII междуна. научно-практ. симпозиума. – Екатеринбург. 2013. С. 190-198.
4. Никифоров, Д.А. Влияние корректировки параметров программного комплекса НЕС-RAS на точность гидравлических расчетов и формализация процесса калибровки гидравлических моделей рек и водохранилищ// Чистая вода России. Сб. материалов XII междуна. научно-практ. симпозиума. – Екатеринбург, 2013. С. 226-234.
5. Тихонов, А.Н. «Методы решения некорректных задач» (1974). Методы решения некорректных задач / А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин. – М., Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. Изд. 2-е. 284 с.
6. Штеренлихт, Д.В. Гидравлика. Учебник для ВУЗов. 3-е изд. – М.: КолосС, 2004. 656 с.

METHODS OF CALIBRATION THE HYDRAULIC MODELS OF RIVERS AND RESERVOIRS

© 2015 D. A. Nikiforov

Institute of Water Problems RAS, Moscow

At creation the computer models of water objects for hydraulic calculations major importance has the adequacy to the developed model to real water object. Such adequacy is reached by calibration the parameters of model. The calibration essence as problems of optimization, methods and techniques of carrying out calibration of computer hydraulic models of water objects with use of HEC-RAS program complex as calculated tool is described.

Key words: river, reservoir, hydraulic modeling, calibration, program complex

Dmitriy Nikiforov, Minor Research Fellow at the Laboratory of Water Resources Management. E-mail: dmitry.nikif@gmail.com