

УДК 532.543.011.11/18

© 1990 г.

Г. А. ЛЮБИМОВ

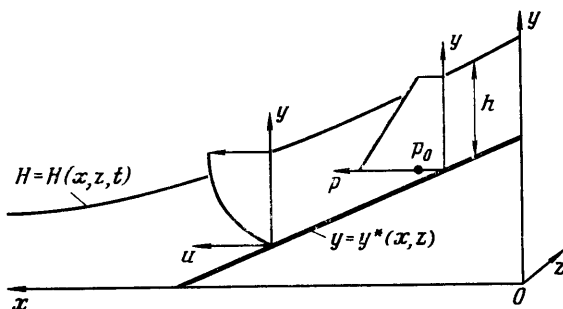
О ГИДРАВЛИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ТЕЧЕНИЯ В ДЕЛЬТЕ НЕВЫ И ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ФИНСКОГО ЗАЛИВА

В связи со строительством сооружений, защищающих Ленинград от наводнений, были предприняты исследования течения в устье реки Невы на гидравлических моделях разного масштаба как безнапорных (см., например, [1, 2]), так и напорных (см., например, [3]). Так как результаты этих исследований усиленно дебатировались в связи с дискуссиями о влиянии защитных сооружений на экологическую обстановку в районе Ленинграда, представляет интерес проанализировать научные основы гидравлического моделирования подобных течений.

1. Основы гидравлического моделирования. В основе гидравлического моделирования устьев больших рек лежит переход от исследования трехмерного течения к исследованию двумерного течения, описывающего средние по глубине характеристики исходного течения. С математической точки зрения этот переход связан с осреднением уравнений, описывающих турбулентное течение несжимаемой жидкости.

Введем систему координат так, как представлено на фиг. 1, и определим средние по глубине потока величины следующим образом:

$$\langle a \rangle(x, z, t) = \frac{1}{h} \int_{y^*(x, z)}^{H(x, z, t)} a \, dy, \quad h(x, z, t) = H(x, z, t) - y^*(x, z) \quad (1.1)$$



Фиг. 1

Здесь $y = y^*(x, z)$ — уравнение поверхности дна; $H = H(x, z, t)$ — уравнение свободной поверхности потока; $h(x, z, t)$ — глубина потока.

Используя определение средних (1.1), осредняют уравнения, описывающие турбулентное течение жидкости. При этом в уравнениях кроме средних значений самих функций появляются средние значения их произведений. Поэтому для возможности решения задач необходимо опереться на дополнительные предположения, связанные с постановкой задачи, которые позволили бы упростить эти уравнения за счет пренебрежения теми или иными членами либо установить дополнительные связи между средними величинами.

В рассматриваемых течениях (течения в устьях крупных рек) характерная глубина потока h_* много меньше его характерных горизонтальных (плановых) размеров L_x, L_z : $h_* \ll b = \min\{L_x, L_z\}$. Примем дополнительно, что рельеф дна достаточно плавный, так что характерная длина изменения функции $y = y_*(x, z)$ совпадает с величиной b . В этих условиях естественно принять, что среди компонент тензора вязких напряжений τ_{ij} наибольшими являются τ_{xy}, τ_{zy} . При наличии на дне искусственных сооружений или мелей, как это имеет место в устье Невы, это предположение становится менее очевидным.

Условие малой глубины потока позволяет сделать еще одно упрощение. В уравнения для планового (в плоскости x, z) течения входит функция $\langle p \rangle = \langle p \rangle(x, z, t)$ — среднее по глубине давление, связь которой с другими параметрами должна быть задана при постановке задачи. Для течений большой протяженности в плане и малой глубины распределение давления по глубине можно считать близким к гидростатическому

$$p(x, y, z, t) = p_0 + \rho g [H(x, z, t) - y] \quad (1.2)$$

При этом среднее давление определяется формулой

$$\langle p \rangle(x, z, t) = p_0 + \frac{1}{2} \rho g [H(x, z, t) - y^*(x, z)] = p_0 + \frac{1}{2} \rho g h \quad (1.3)$$

Здесь ρ — плотность жидкости; g — ускорение силы тяжести.

В приближении малой глубины потока $h_* \ll b$ при достаточно плавном дне уравнения, описывающие плановое поле скоростей течения (проекции u, w осредненной скорости на оси x, z соответственно), существенно упрощаются и принимают вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + w \frac{\partial h}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= -g \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial y_*}{\partial x} \right) - \frac{1}{\rho h} \tau_{xy} - K_x \frac{1}{h} \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} &= -g \left(\frac{\partial h}{\partial z} + \frac{\partial y_*}{\partial z} \right) - \frac{1}{\rho h} \tau_{yz} - K_z \frac{1}{h} \\ K_x &= \frac{\partial (uu)' h}{\partial x} + \frac{\partial (uw)' h}{\partial z}, \quad K_z = \frac{\partial (uw)' h}{\partial x} + \frac{\partial (ww)' h}{\partial z} \end{aligned} \quad (1.4)$$

$$(uu)' = \langle u^2 \rangle - \langle u \rangle \langle u \rangle, \quad (uw)' = \langle uw \rangle - \langle u \rangle \langle w \rangle, \quad (ww)' = \langle w^2 \rangle - \langle w \rangle \langle w \rangle$$

В этих уравнениях $\tau_{xy}(x, y = y_*, z), \tau_{yz}(x, y = y_*, z)$ — напряжения трения на дне потока; K_x, K_z — корреляционные члены, определяемые отличием истинных распределений скоростей по глубине потока от их средних значений. При решении конкретных задач эти величины или их зависимость от определяющих задачу параметров должны быть заданы, исходя из постановки задачи или дополнительных предположений.

В протяженных русловых турбулентных потоках влияние дна сосредоточено в относительно тонком слое. При этом распределение скоростей по глубине в основной части потока близко к однородному и естественным представляется предположение $K_x = K_z = 0$. (О постановках задач, в которых корреляционные члены не равны нулю, смотри в [4].)

Зависимость напряжения трения на дне потока от параметров течения и характера дна (шероховатости) определяют в специальных натурных и лабораторных экспериментах. Обычно эти эксперименты обрабатываются по формулам следующей структуры:

$$\tau_{ij}(y = y_*) = \lambda(\text{Re}, \dots) \rho u^2, \quad \text{Re} = \rho u h / \mu \quad (1.5)$$

Безразмерная функция λ , называемая коэффициентом трения, зависит от безразмерных параметров — локального числа Рейнольдса, геомет-

рических параметров, описывающих характер дна (геометрические размеры элементов шероховатости дна, их расположение и т. д.), а также, возможно, от других характеристик потока (например, связанных с характеристиками турбулентности).

При принятых предположениях система уравнений (1.4), описывающих плановое поле скоростей потока, приобретает вид уравнений Сен-Венана.

Выберем в качестве характерных параметров: b — характерный плановый размер течения, h_* — характерная глубина, U — характерная скорость, определяемая суммарным расходом, t_* — характерное время в нестационарных задачах. Используя эти характерные параметры, приведем систему уравнений Сен-Венана к виду (для обозначения безразмерных величин используем те же буквы)

$$\begin{aligned} St \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uh) + \frac{\partial}{\partial z}(wh) &= 0 \\ St \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= -\frac{1}{Fr} \left(\frac{\partial h}{\partial x} - i_{0x} \frac{b}{h_*} \right) - \beta \frac{u^2}{h} \\ St \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} &= -\frac{1}{Fr} \left(\frac{\partial h}{\partial z} - i_{0z} \frac{b}{h_*} \right) - \beta \frac{w^2}{h} \end{aligned} \quad (1.6)$$

$$\lambda = \lambda(uh \text{ Re}_0, \dots), \quad i_{0x} = -\frac{\partial y_*}{\partial x}, \quad i_{0z} = -\frac{\partial y_*}{\partial z} \quad (1.7)$$

$$St = \frac{b}{Ut_*}, \quad Fr = \frac{U^2}{gh_*}, \quad \beta = \lambda \frac{b}{h_*}, \quad \text{Re}_0 = \rho \frac{Uh_*}{\mu}$$

Система, описывающая плановое поле средних по глубине скоростей руслового потока, зависит от четырех безразмерных параметров St , Fr , Re_0 , β (чисел Струхала, Фруда, Рейнольдса, параметра трения) и безразмерных параметров, определяющих шероховатость дна, характеристики турбулентности и т. д.

Кроме указанных параметров, связанных с системой уравнений, поле течения в конкретной задаче зависит от геометрии русла и граничных условий в выбранных контрольных сечениях потока, которые в свою очередь могут зависеть от дополнительных по отношению к (1.7) параметров.

В достаточно полной форме анализ возможных (в зависимости от постановки задачи) безразмерных параметров, определяющих поле течения, содержится в монографии [5].

Имея в виду обсудить возможность моделирования течения в устье Невы и восточной части Финского залива, будем рассматривать только такие течения, в которых в качестве граничных условий можно задать уровни потока и распределения плановых скоростей в некоторых выбранных сечениях потока. В этом случае граничные условия не вносят в задачу дополнительных по отношению к системе уравнений (1.6) безразмерных параметров.

Возможность моделирования крупномасштабных потоков на моделях небольшого масштаба связана с тем, что система уравнений (1.6) с граничными условиями описывает течение как в натуре, так и в модели. Поэтому если безразмерные параметры, фигурирующие в системе уравнений и граничных условиях, совпадают по величине для модели и натуре, то и безразмерные поля скоростей в безразмерных координатах будут совпадать.

Моделирование крупномасштабных потоков на геометрически подобной модели, т. е. при одинаковом изменении плановых и вертикальных размеров ($h_*/b = \text{idem}$), может встретить технические трудности. Например,

для рассматриваемой задачи о течении в устье Невы $h_* \sim 3$ м, $b \sim 30$ км ($h_*/b \sim 10^{-4}$). В этих условиях даже для модели с плановым масштабом ~ 100 м глубина потока должна составлять величину $\sim 10^{-2}$ м. Ясно, что работать с потоком глубиной в 1 см на модели с характерным размером 100 м неудобно по целому ряду причин.

Выходом из этих затруднений представляется моделирование на моделях с искажением вертикального и планового масштабов так, чтобы изменение вертикального масштаба было меньше изменения планового. В этом случае имеем

$$\left. \frac{h_*}{b} \right|_M = k \left. \frac{h_*}{b} \right|_H \quad \left(\frac{h_*}{b} \neq \text{idem} \right) \quad (1.8)$$

$$k = \alpha/\gamma, \quad h_{*M} = \alpha h_{*H}, \quad b_M = \gamma b_H, \quad \alpha < 1, \quad \gamma < 1, \quad \alpha > \gamma, \quad k > 1$$

Легко видеть, что при условии (1.8) члены, связанные с уклоном, в (1.6) не изменятся, так как $i_{0M} = i_{0H} k$.

Для того чтобы найти связи между значениями характерных параметров для модели и природы, надо исходить из того, что безразмерные параметры (1.7) для природы и модели должны совпадать. При этом из условий $Fr = \text{idem}$, $St = \text{idem}$, $\beta = \text{idem}$ получим

$$\frac{U_M^2}{U_H^2} = \frac{h_{*M}}{h_{*H}} = \alpha, \quad \frac{U_M}{U_H} = \sqrt{\alpha} \quad (1.9)$$

$$\frac{t_{*M}}{t_{*H}} = \frac{b_M}{U_M} \frac{U_H}{b_H} \sim \frac{\gamma}{\sqrt{\alpha}} \quad (1.10)$$

$$\lambda_M \frac{b_M}{h_{*M}} = \lambda_H \frac{b_H}{h_{*H}} = \lambda_H k \frac{b_M}{h_{*M}}, \quad \lambda_M = k \lambda_H \quad (1.11)$$

Пользуясь соотношениями (1.8), (1.9), можно найти, в частности, связь между расходами на природе и на модели

$$Q_H \sim h_{*H} b_H U_H, \quad Q_M \sim h_{*M} b_M U_M, \quad Q_M = \alpha^{3/2} \gamma Q_H \quad (1.12)$$

Соотношения (1.8)–(1.12) показывают, что моделирование с искажением масштаба модели возможно (в смысле сохранения условия равенства параметров (1.7) для природы и модели), если выполнить соотношения (1.8)–(1.10) между характерными параметрами модели и природы и если сделать коэффициент трения на модели в k раз большим, чем на природе (условие (1.11)). При моделировании без искажения масштабов ($k=1$) условие $\beta = \text{idem}$ переходит в условие $\lambda_M = \lambda_H$.

Наконец, из условия $Re_0 = \text{idem}$ следует, что должно выполняться условие

$$U_M h_{*M} = U_H h_{*H}, \quad \frac{U_M}{U_H} = \frac{h_{*H}}{h_{*M}} = \frac{1}{\alpha} \quad (1.13)$$

Сопоставление условия (1.13) с (1.9) показывает, что их одновременное выполнение невозможно (при моделировании $\alpha < 1$) и этот вывод не зависит от того, искажаются или нет масштабы при моделировании. Таким образом, моделирование русловых потоков с одновременным выполнением условий равенства на модели и природе всех безразмерных параметров (1.7) невозможно.

2. Области автомодельности. Несмотря на общий отрицательный вывод о возможности моделирования всего рассматриваемого класса течений, в отдельных случаях для более узкого класса течений моделирование оказывается возможным. Это обстоятельство связано с тем, что в силу постановки конкретной задачи может оказаться, что поле течения в определенной области значений безразмерных параметров (1.7) не зависит

от конкретного значения одного или нескольких из них. Области значений параметров (1.7), в которых поле скоростей не зависит от конкретного значения какого-либо из них, называются областями автомодельности по соответствующему параметру для рассматриваемой задачи.

Если по какому-то параметру существует для данного класса течений область автомодельности, то соответствующее условие равенства безразмерных параметров для модели и природы заменяется требованием того, чтобы значения соответствующего параметра для модели и природы принадлежали бы области автомодельности (очевидно, что последнее условие значительно слабее). Вопрос о том, существуют ли для рассматриваемого класса течений области автомодельности по какому-либо (или совокупности) из параметров (1.7) и каковы они, имеет принципиальное значение, так как с ответом на него связано обоснование возможности моделирования рассматриваемого течения.

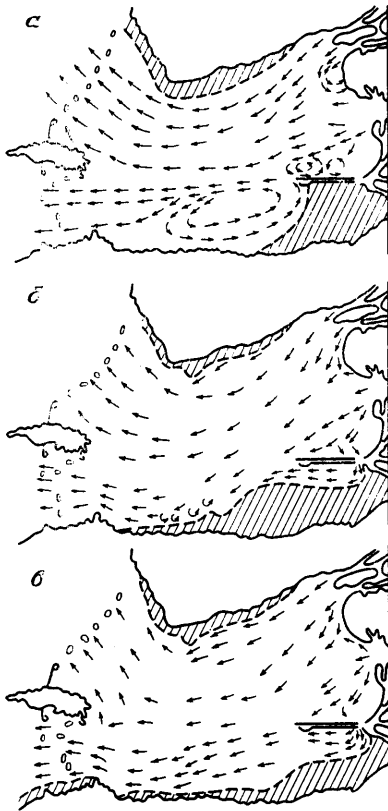
Для конкретизации дальнейших рассуждений будем обращаться к опыту моделирования течения в устье Невы, выполненному на ряде установок [1—3].

Область автомодельности по числу Рейнольдса. В турбулентных потоках коэффициент трения λ перестает зависеть от числа Рейнольдса, если $Re_0 > Re_*$, и определяется только характером шероховатости дна. Это неравенство определяет, таким образом, область автомодельности по числу Рейнольдса.

В натуре в рассматриваемом классе русловых течений условие $Re_0 > Re_*$ всегда выполняется, причем для естественной шероховатости дна $Re_* \sim 10^3$ [6]. Для течения в устье Невы, например, $Re_0 \sim 10^5$. Следовательно, возможность моделирования данного класса течений на конкретной модели связана с необходимостью реализации на модели течения условия $Re_{0,m} > Re_{*,m}$. Значение критического числа Рейнольдса, ограничивающего область автомодельности для модели $Re_{*,m}$, может отличаться от величины 10^3 , соответствующей течению с шероховатостью дна, близкой к естественной. Вопрос об определении $Re_{*,m}$ стоит особенно остро при использовании моделей с искажением масштабов, так как в этих моделях для выполнения условия (1.11) обычно используют крупномасштабные элементы, устилающие дно. Эти элементы, призванные увеличить гидравлическое сопротивление, существенно влияют на течение не только в придонном слое, но и, возможно, во всем потоке. При этом критическое число Рейнольдса может зависеть от конкретной структуры дна («крупномасштабной шероховатости»). Отметим, что использование крупномасштабной шероховатости в моделях устья Невы потребовало специальных исследований коэффициента трения [7], однако данные по значению критического числа Рейнольдса для этих условий в этой работе отсутствуют, а при обосновании возможностей моделирования опираются на то же значение, что и для природы $Re_* = 10^3$ [1].

Использование крупномасштабной шероховатости влечет за собой также необходимость исследования зависимости коэффициента трения от числа Фруда (то, что такая зависимость может существовать показано на фиг. 2 [5]), а также распределения скоростей по глубине потока с целью проверки выполнения условий $K_x = K_z = 0$, определяющих вид гидравлической системы уравнений. При моделировании течения в устье Невы [1] использовавшиеся элементы крупномасштабной шероховатости имели размер порядка $1/3 - 1/4$ глубины потока. В этих условиях вряд ли можно ожидать однородного распределения скоростей по глубине потока и, следовательно, выполнения условий $K_x = K_z = 0$.

Область автомодельности по числу Фруда. Автору не удалось найти в литературе работ, в которых бы обосновалась область автомодельности по числу Фруда для планового поля течения в рассматриваемых задачах. В области малых значений числа Фруда автомодельность демонстрируется на примере некоторых характеристик ряда течений [5] — протя-



Фиг. 2

женности зоны возвратных течений при внезапном расширении лотка, коэффициенте трения в лотке с усиленной шероховатостью дна и коэффициенте сопротивления частично затопленного тела. Тем не менее в работах по моделированию течения в устье Невы (см., например, [1]) указывается на то, что такая область существует и определяется условием $Fr \leq Fr_* = 0,05$.

В связи с этим рассмотрим на основе общих соображений вопрос о возможности существования области автомодельности по числу Фруда в задаче о плановом поле скоростей руслового потока при малых значениях числа Фруда $Fr \ll 1$.

Из уравнений (1.6) следует, что автомодельная область по числу Фруда (независимость поля скоростей от числа Фруда) при $Fr \ll 1$ может существовать в рассматриваемых течениях в том случае, если члены

$$\frac{1}{Fr} \left(\frac{\partial h}{\partial x} - i_x \frac{b}{h_*} \right) \ll 1, \quad (2.1)$$

$$\frac{1}{Fr} \left(\frac{\partial h}{\partial z} - i_z \frac{b}{h_*} \right) \ll 1$$

т. е. при малых числах Фруда, много меньше остальных членов уравнений (1.6).

Выполнение условий (2.1) при $Fr \ll 1$ возможно в двух случаях

$$(i_{0x}, i_{0z}) \ll Fr \frac{h_*}{b}, \quad \frac{\partial h}{\partial x} \ll Fr, \quad \frac{\partial h}{\partial z} \ll Fr \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial x} - i_{0x} \frac{b}{h_*} \ll Fr, \quad \frac{\partial h}{\partial z} - i_{0z} \frac{b}{h_*} \ll Fr \quad (2.3)$$

Условия (2.2) соответствуют течению при очень малом уклоне со свободной поверхностью, близкой к горизонтальной ($h = \text{const}$). Автомодельная область при этом может существовать, если граничные условия допускают при $i_0 \ll (h_*/b)Fr$ решение системы (1.6) при $h = \text{const}$.

Автомодельная область в случае (2.3) может существовать, если граничные условия допускают решения системы (1.6), в которых

$$h = \frac{b}{h_*} \left[\int_0^x i_{0x} dx + \int_0^z i_{0z} dz \right] + f(t) \quad (2.4)$$

Здесь $f(t)$ — произвольная функция времени. Для стационарных задач $f(t) = \text{const}$.

Таким образом, в принципе в рассматриваемом классе течений, когда в виде граничных условий задаются уровни поверхности и скорости в некоторых сечениях потока, автомодельные области при малых числах Фру-

да могут существовать. Но реализуются ли они в конкретных течениях и при каких значениях Fr_* , можно сказать только на основе исследования (теоретического или экспериментального) данного класса течений. Такие исследования для течений, характерных для устья Невы, отсутствуют.

Однако один общий вывод можно сделать сейчас на основе соотношений $h = \text{const}$ или (2.4). Если при постановке задачи уровень свободной поверхности задается в двух сечениях потока, то автомодельная область по числу Фруда при малых числах Фруда существовать не может. Отсюда следует, в частности, что при моделировании нестационарных сгонно-нагонных течений, когда уровень жидкости задается в двух сечениях, нельзя пользоваться соображениями, вытекающими из условий существования автомодельной области по числу Фруда при малых числах Фруда ($Fr \leq 0,05$). Моделирование этих задач должно опираться на условие $Fr = \text{idem}$.

Область автомодельности по параметру трения. На примере анализа подходов к отысканию областей автомодельности по параметру трения β можно проиллюстрировать общие соображения, высказанные выше относительно необходимости анализа конкретного течения.

На основе многочисленных экспериментальных данных (их обобщение см. [5, 8]) по исследованию влияния параметра β на протяженность водоворотных зон в области внезапного расширения потока выявлена область автомодельности по параметру β для этого класса течений [8]: $\beta > \beta_* \sim 2$.

Однако эта область автомодельности не является таковой для поля руслового течения. Этот вывод следует из анализа результатов работы [3], в которой исследовалось влияние шероховатости модели на плановое поле течения в аэродинамической модели устья Невы. Характерные размеры модели $h_* \sim 3/150 \sim 2 \cdot 10^{-2}$ м, $b \sim 3 \cdot 10^4 / 5 \cdot 10^3 \sim 6$ м, $b/h_* \sim 3 \cdot 10^2$. Исследованная шероховатость соответствовала коэффициентам трения $\lambda_1 = 0,01$, $\lambda_2 = 0,026$, $\lambda_3 = 0,045$. В соответствии с этим параметр β принимал значения: $\beta_1 \sim 3$, $\beta_2 \sim 7,5$, $\beta_3 \sim 13$. Соответствующие этим значениям параметра β (или λ) плановые распределения скоростей представлены на фиг. 2 [3]. На этом рисунке стрелками 1 представлено поле скоростей, штриховкой 2 — застойные зоны со скоростями менее 2 см/с. Сравнение полей течения показывает, что все они различны между собой, причем сопоставление с натурными данными показывает, что при $\beta = \beta_*$ модельное поле скоростей в основной части течения близко к натурному, хотя оно и не воспроизводит еще некоторых деталей (в районе Ломоносовской отмели и Морского канала). Отсюда следует, что если и существует область автомодельности для рассматриваемого течения по параметру β , то ее граница лежит по крайней мере при $\beta \geq 15$. Но возможно, что область автомодельности по β для данного класса течений вообще не существует. Обнаруженная в опытах близость профилей плановых скоростей на модели при $\beta \sim 13$ и натуре может быть связана с тем, что значение параметра β для натуре имеет близкое значение (при $b = 3 \cdot 10^4$ м, $h_* \sim 3$ м, $\lambda \sim 0,002$, ($\beta \sim 20$) и, следовательно, в этих условиях осуществляется моделирование при условии $\beta = \text{idem}$, а не $\beta > \beta_*$.

Проведенный анализ показывает, что вопрос о существовании области автомодельности по параметру β для рассматриваемого класса течений нуждается в дополнительном исследовании.

3. О возможности моделирования течения в устье Невы. Проведенный в разд. 2 анализ областей автомодельности по безразмерным параметрам (критериям) (1.7) позволяет сделать некоторые заключения о возможности моделирования течения в устье Невы.

Сформулируем требования, которым должна удовлетворять гидравлическая модель этого течения.

Прежде всего, учитывая масштабы изучаемого течения, такая модель должна быть моделью с искажением масштабов. Сам по себе этот факт

независимо от других условий моделирования накладывает некоторые ограничения. Богатая практика моделирования на моделях с искаженными масштабами показывает (см. об этом подробнее в [5, 6]), что искаженные масштабы не может быть большим (в обозначениях (1.8)): $k \lesssim 5$. Моделирование при больших значениях k (такие примеры описаны в [6]) требует проведения специальных исследований, которые бы установили, какие из параметров потока при этом моделируются, а какие — нет. Основой этих исследований должно быть сопоставление параметров модели и природы в широком диапазоне условий течения.

Так как существует область автомодельности по числу Рейнольдса, то на модели необходимо обеспечить числа Рейнольдса, большие критических. Значение критического числа Рейнольдса при использовании крупномасштабной шероховатости неизвестно. При использовании умеренной шероховатости можно принять $Re_{0M} > Re_* \sim 10^3$. Если в течении присутствуют протяженные области с существенно различающимися значениями характерных глубин и скоростей (как это имеет место в устье Невы), то условию $Re_{0M} > Re_*$ должны удовлетворять и значения «местных» для этих областей чисел Рейнольдса. В противном случае в пределах этих областей коэффициент трения в модели будет определяться иными по отношению к натуре закономерностями и это приведет при большой протяженности таких областей к невозможности моделирования всего течения.

В разд. 2 показано, что в настоящее время отсутствует обоснование существования и границ области автомодельности по числу Фруда для рассматриваемого течения и условий чисто стокового течения, а также что для сгонно-нагонных условий область автомодельности по числу Фруда отсутствует. В связи с этим при построении моделей необходимо соблюдать условие $Fr = idem$ ($Fr_M = Fr_H$).

Это условие (отсутствие области автомодельности по числу Фруда) исключает возможность «форсирования» расхода, т. е. увеличения расхода по отношению к требуемому условием (1.12) с целью увеличения числа Рейнольдса и удовлетворения условию $Re_{0M} > Re_*$.

В связи с тем, что в настоящее время отсутствует обоснование существования автомодельной области по параметру β при построении моделей необходимо соблюдать условие

$$\beta = idem, \quad \lambda_H \frac{b_H}{h_{*H}} = \lambda_M \frac{b_M}{h_{*M}} \quad (3.1)$$

Необходимо иметь в виду, что удовлетворение условия (3.1) за счет использования крупномасштабной шероховатости должно осуществляться с осторожностью и контролем того, что это не приводит к изменению Re_* и нарушению условий $K_x = K_y = 0$.

В качестве иллюстрации сформулированным требованиям рассмотрим характеристики большой гидравлической модели устья Невы и восточной части Финского залива, созданной в ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева [1]. Отношение вертикального и планового масштабов в этой модели $k = 10$, характерное число Рейнольдса $Re_0 \sim 350$, число Фруда $Fr \sim 5 \cdot 10^{-5}$, число $\beta_{min} \geq 15$ (если принять $\lambda \geq 0,015$ [1]). Натурные условия характеризуются числами $Fr_H \sim 5 \cdot 10^{-5}$, $\beta_H \sim 20$. Таким образом, рассматриваемая модель не удовлетворяет условиям $k \lesssim 5$, $Re_{0M} > 10^3$, а условие (3.1) может быть удовлетворено за счет подбора шероховатости модели приближенно. Ясно, что в этом случае нельзя говорить о моделировании на данной установке течения в Невской губе.

Последний вывод может быть подвергнут сомнению и в качестве возражения можно представить данные, свидетельствующие о хорошем соответствии между плановым полем течения на модели и натурными измерениями. Такое возражение нуждается в глубоком анализе, в процессе которого надо иметь в виду следующее.

В силу своей физической сущности модель должна воспроизводить средние по глубине, «расходные» скорости течения. Однако ни в одной из работ, посвященных анализу течения в Невской губе, нет сопоставления плановых распределений средних скоростей; демонстрируется только сопоставление плана скоростей на поверхности. По-видимому, не надо доказывать, что средние и поверхностные скорости могут существенно различаться, особенно в условиях сложной структуры дна.

Для воспроизведения распределения скоростей на поверхности потока для выбранных условий течения в распоряжении исследователя имеется неконтролируемый рычаг — подбор распределения шероховатости дна.

В связи с последним обстоятельством ясно, что серьезный анализ возможностей моделирования должен опираться не на единичное сопоставление, а на широкий набор экспериментальных данных и натурных измерений.

4. Заключение. Проведенный анализ показывает, что при проектировании основной гидравлической модели, используемой для моделирования влияния защитных сооружений на гидродинамику Невской губы, допущены существенные отступления от принципов гидравлического моделирования и не были проведены необходимые методические исследования. В связи с этим результаты модельных экспериментов на этой модели (и моделях меньших масштабов, но по существу с теми же значениями безразмерных критериев) не могут использоваться для подтверждения или опровержения каких-либо выводов относительно влияния защитных сооружений на гидродинамику отгороженной части Невской губы.

В связи с тем, что часто на основе анализа модельных экспериментов делаются выводы о несущественном влиянии защитных сооружений на экологическую обстановку в регионе, необходимо подчеркнуть, что существующие гидравлические модели в принципе не приспособлены для моделирования тонких эффектов, определяющих экологическую обстановку: стратификационные течения, определяющие уровень солености в Невской губе; ветровые течения (заметно влияют на течение в устье Невы примерно в 90 случаях из 100); волновые процессы, обеспечивающие перемешивание воды и вынос загрязнений; процессы оседания частиц, выносимых рекой, и т. д. Даже при анализе чисто стокового течения или сгонно-нагонных ситуаций наименее надежно моделируется течение на мелководье, т. е. именно в тех областях, где развиваются основные биологические и биохимические процессы, определяющие качество воды.

Таким образом, существующие гидравлические модели устья Невы в принципе не приспособлены для решения задач, связанных с анализом экологической обстановки в регионе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маневич Я. З., Мошков Л. В., Сысоева Л. М. Лабораторные исследования стоковых течений в Невской губе Финского залива в связи с проблемой защиты г. Ленинграда от наводнений // Изв. ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 1979. Т. 132. С. 24–35.
2. Бологовский С. В., Левина С. М. Лабораторные исследования нестационарных режимов в Невской губе // Изв. ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 1979. Т. 132. С. 36–46.
3. Маневич Я. З. Влияние шероховатости при изучении планов течений на моделях с искажением масштабов // Изв. ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 1982. Т. 154. С. 65–69.
4. Шеренков И. А. Прикладные плановые задачи гидравлики спокойных потоков. М.: Энергия, 1978. 240 с.
5. Ляггер В. М., Друдовский А. М. Гидравлическое моделирование. М.: Энергоатомиздат, 1984. 392 с.
6. Шарп Дж. Дж. Гидравлическое моделирование. М.: Мир, 1984. 280 с.
7. Маневич Я. З. Исследование коэффициента гидравлического трения в случае «правильной» искусственной шероховатости // Изв. ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 1985. Т. 179. С. 28–34.
8. Маневич Я. З. О гидравлическом моделировании с искажением масштабов моделей // Изв. ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 1977. Т. 115, С. 67–72.

Москва

Поступила в редакцию
24.IV.1990