МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР

МОСКОВСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ВОДНОГО ХОЗЯЙСТВА
имени В. Р. ВИЛЬЯМСА

(На правах рукописи)

Асп. ХОУ ФИ-ЧАН

„ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ПОДОБИЯ" К МОДЕЛИРОВАНИЮ РУСЛОВЫХ ПОТОКОВ И ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ДОННЫХ НАНОСОВ

АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

**Научный руководитель,
доктор технических наук,
профессор Ф. И. ПИКАЛОВ**

МОСКВА — 1954 г.

A-2

Гидротехническое строительство в СССР и в Китае в настоящее время принимает невиданные в их истории и в истории капиталистических стран размеры. Гидравлические исследования в деле этого строительства имеют своей важной целью проверить работу проектируемых сооружений на подобных им моделях и тем самым поправить и улучшить их.

Вызванные бурным развитием гидротехнических строек в наших странах, теория и метод гидравлических исследований преобретают важное значение.

Одну из практических важных и теоретических более трудных отраслей гидравлических исследований представляет собой моделирование русловых потоков. Изучение метода моделирования русловых потоков до сих пор ограничивается плоской или приблизительно плоской задачей (так называемый плавно-изменяющийся поток).

Советские ученые сделали большой вклад в разработку вопросов моделирования русловых потоков. Этим вопросом посвящены работы С. Т. Алтунина, М. А. Великанова, И. В. Егиазарова, С. В. Избаша, И. И. Леви, Ф. И. Пикалова, Н. А. Ржаницына и других.

В Китае этот вопрос тоже широко изучают.

Однако, несмотря на существующие работы и достигнутые успехи в этой области, остается еще много нерешенных вопросов, или вопросов, неимеющих общепринятых решений. К их числу относится, например, такой принципиально важный вопрос: «Что представляют необходимые и достаточные условия подобия русловых потоков в подвижных руслах?».

Диссертация посвящена рассмотрению ряда таких вопросов. В ней мы поставили и рассмотрели цели моделирования русловых процессов и особенности моделирования русловых потоков с точки зрения теории подобия. Исходя из этих пониманий, нами были рассмотрены основные существующие методы расчета неразмываемых и размываемых моделей.

Диссертация составлена из пяти глав, объемом 150 стр. В первой главе излагаются основные понятия теории подобия потоков. Метод моделирования русловых потоков (в неразмываемых руслах и размываемых руслах), как и метод моделирования других процессов, должен базироваться на теории подобия движения жидкости. С точки зрения теории подобия сущность моделирования русловых потоков заключается в разрешении характеризующих их уравнений экспериментальным путем. Однако, не всякий процесс может быть точно моделирован, т. е. не любое уравнение процессов может быть разрешено опытным путем (подобно тому, как не всякое уравнение может быть решено теоретическим путем), потому что не всякое явление может характеризоваться уравнениями, все элементы которых входят в условия однозначности.

Для того, чтобы уравнения могли быть решены экспериментальным путем, необходимо прежде всего (но недостаточно), чтобы элементы, не входящие в условия однозначности, могли быть конкретно выражены через элементы, входящие в условия однозначности.

Цель моделирования русловых потоков заключается в осуществлении динамического подобия в потоке; так как динамическое поле определяется кинематическим полем (в частности, полем скоростей), то условия однозначности в нашем случае суть определенное кинематическое поле на границах потока в некоторый момент времени. Следовательно, динамическое подобие тоже определяется кинематическим подобием потоков. Однако, не всякое кинематическое подобие потоков означает динамическое подобие их. Кинематическое подобие в потоках, где действуют силы тяжести, может обеспечить динамическое подобие только при наличии условия $Fr = idem$.

Поэтому необходимое и достаточное условие динамического подобия замкнутых потоков (потоков конечных размеров) можно сформулировать следующим образом: если кинематические элементы и геометрическая характеристика, (т. е. элементы, входящие в условия однозначности в нашем случае) составляют подобные значения преобразований, а критерии, определенные уравнениями потоков и составленные из указанных величин, имеют одно и то же числовое значение, то потоки, определяемые этими уравнениями и условиями однозначности, будут динамически подобными.

Характерным для русловых потоков критерием является коэффициент λ (C). С одной стороны, постоянное отношение его непросредственно связано с тождеством крутерия Eu, с

другой стороны, оно и обеспечит удовлетворение условию о тождестве граничных условий (подобное распределение скорости у стенок) при подобном геометрическом состоянии границ потоков. Существующие опыты по напорным движениям показывают, что режим в квадратичной области, характеризуемый подобной относительной шероховатостью, обладает свойством подобия распределения скоростей при любом отношении чисел Re. Иначе говоря, в квадратичной области условие $Re_{\prime} = idem$ перестает быть необходимым условием кинематического подобия потока, в то время как оно является одним из необходимых условий при тождестве уравнений Навье-Стокса или Рейнольдса—для незамкнутых безграничных потоков.

С точки зрения теории подобия напорный равномерный поток является простейшей формой движения потока жидкости, так как его критериальная зависимость выражается, как известно, просто $Eu = f(Re)$, т. е. $\lambda = f(Re)$.

Для открытого потока, в котором всегда действует сила тяжести, критериальная зависимость будет такой:

$$Eu = f(Re,\ Fr) \text{ или } \lambda = f(Re,\ Fr)$$

Однако, для равномерного открытого потока критерии Re и Fr имеют между собой связь при определенной относительной шероховатости, тогда $Re = f_1(Fr)$ или $Fr = f_2(Re)$. Эта связь была установлена нами опытным путем и может быть доказана при анализе определения этих критериев.

Следовательно, для открытого равномерного потока критериальная зависимость так же будет иметь такой вид

$$Eu = f(Re) \text{ или } \lambda = f(Re)$$

с точки зрения теории подобия напорный равномерный поток и безнапорный равномерный поток имеют одинаковое содержание, т. е. графики тицпа Никурадзе и типа А. П. Зегжда тождественны (при этом не имеется ввиду тождественность их числовых значений).

Однако, строгая равномерность в открытом потоке не имеет места, поэтому квадратичная область для моделирования руслового потока не только является автомодельной, но и теоретически единственно допустимой областью.

График типа А. П. Зегжда в отношении моделирования русловых потоков должен служить указателем того, чтобы с одной стороны, обеспечить нахождение подобного геометрического состояния границ потока для модели, с другой стороны, обеспечить сохранение соответствующего модельного режима в квадратичной области.

Вторая и третья главы диссертации посвящены рассмотрению вопроса о моделировании и расчете русловых установившихся и неустановившихся потоков.

При масштабном преобразовании уравнений, характеризующих эти потоки (установившееся или неустановившееся движение) мы можем находить критерии подобия русловых потоков. Такой метод определения критериев общепринят. Однако, нужно заметить, что уравнения русловых потоков есть упрощенные уравнения Навье-Стокса и Рейнольдса, характеризующие движения незамкнутого потока. Следовательно, условия для тождества уравнений русловых потоков (критерии и критериальные зависимости) по существу суть условия для тождества уравнений незамкнутых потоков. Между прочим видоизмененные критерии для последнего случая и будут критериями для русловых потоков, например, вместо критерия *Eu*, в состав критериев входит коэффициент λ; при этом все критерии составляются из средних элементов.

Расчет моделирования руслового потока в неразмываемой модели заключается в осуществлении тождества всех критериев при геометрическом подобии модели (включая подобие состояния границ потока), кроме условия о тождестве критерия *Re*.

Осуществление этих условий при кинематическом подобии возможно только в квадратичной области.

Опыты при напорном движении показывают, что только подобная натуре абсолютная и относительная шероховатость сможет обеспечить полное, т. е. местное подобие кинематического поля.

При расчете элементов для модели (главным образом, шероховатости), как для установившегося так и для неустановившегося режимов существуют два отличные друг от друга способа:

1) По эмпирическим формулам;
2) При помощи графика типа А. П. Зегжда.

По первому способу расчета режим может быть подобен по средним показателям (в лучшем случае). Однако, подобие кинематического поля, характеризуемое средним величинами, должно быть следствием местного подобия кинематического поля. Для того, чтобы потоки были местно подобными, необходимо, чтобы были подобными их граничные состояния (шероховатость). С этой точки зрения, мы считаем, что расчет по

первому способу, т. е. по эмпирическим формулам, является условным и неточным. Способ применения графика типа А. П. Зегжда, по нашему мнению, является принципиально правильным. Однако, способы расчета моделирования неразмываемых русел, предложенные А. П. Зегжда, (см. теория подобия и методика расчета гидротехнических моделей 1938 г.). следует уточнить. Нам кажется, главной ошибочной стороной в этих расчетах является допустимость моделирования в неквадратичных областях.

Во второй главе диссертации нами предложены уточненные методы расчета по графику типа А. П. Зегжда.

Но как бы то ни было, удовлетворение условию динамического подобия установившегося потока (в искаженной или в неискаженной модели) является легко достижимым. В случае неустановившегося режима задача несколько осложняется, так как зависимость λ от относительной шероховатости в квадратичной области не линейная, и, следовательно, при изменении относительной шероховатости при неустановившемся режиме можно сохранить постоянное отношение λ только при неискаженной модели. Иначе говоря, если модель неискаженная, то $\lambda_н$ и $\lambda_м$ будут изменяться одинаковым темпом, вследствие чего их отношение будет сохранять постоянное значение в любые соответствующие моменты времени. Наоборот, моделирование неустановившегося режима в искаженной модели может быть только приближенным, так как постоянное отношение коэффициентов λ не может сохраняться в соответствующие моменты времени.

При искаженной модели появляется масштабный множитель смоченных периметров σ_x. Он вообще представляет собой функцию масштабных множителей. Для правильных русел конкретное выражение σ_x может быть найдено при простом масштабном отношении русел. Причем, нетрудно доказать, что если уровень потока в натуре колеблется в пределе прямых откосов отложения, то отношение σ_x при динамическом подобии сохраняет постоянное значение, т. е. зависит только от геометрических масштабов модели.

В четвертой главе нами рассмотрен вопрос о моделировании донных наносов, точнее: моделирование потока в подвижных руслах. Как известно, этот вопрос до сих пор еще не имеет общепринятого решения, хотя и были предложены различные методы расчета в этой области. Нам, кажется, что всем имеющимся различным методам расчета присущ общий недостаток, а именно предположение о необязательном соблюдении динамического подобия потоков. (Мы считаем, что поток и размываемое русло не просто характеризуются двумя взаимными сторонами русловых процессов, когда, «С одной стороны, русло управляет потоком, а с другой стороны, поток управляет руслом» (М. А. Великанов. Динамика руслового потока 1949 г.), а есть главное противоречие руслового процесса, суть которого заключается в том, что определяющее значение в нем имеет поток, так как только поток обладает энергией и именно он создает определенное кинематическое поле, являющееся оригинальной причиной и единственным двигателем руслового процесса.

Коренная цель моделирования (донных наносов должна заключаться в осуществлении динамического подобия потока, в этом отношении моделирование неразмалываемого русла и моделирование размываемого русла тождественны. Так как поток в подвижных руслах характеризуется теми же уравнениями, что и поток в неподвижных руслах, то критерии подобия потока для первого случая будут теми же, что и для последнего. Единственным отличающим является содержание коэффициента λ, которое связано с граничными состояниями потока, т. е. связано с донными наносами.

Так как перемещение донных наносов есть следствие движения жидкости, то подобие перемещения их должно быть результатом протекания подобных потоков, причем перемещения их должны обеспечивать дальнейшее подобие потока. Подобие потоков, являющееся главным содержанием подобия русловых процессов, и подобие перемещения донных наносов едины в подобии (русловых процессов; без любого из них невозможно обеспечить подобия вдоль потоков и во времени.

С этой точкой зрения мы проводили опыты для доказательства следующей «критериальной» зависимости:

$$\lambda = f\left(Re,\ \frac{h_0}{d},\ \frac{U\partial}{\sqrt{\frac{\rho_s-\rho}{\rho_s}gd}}\right);$$

а для квадратичной области:

$$\lambda \equiv f\left(\frac{h_0}{d},\ \frac{U\partial}{\sqrt{\frac{\rho_s-\rho}{\rho_s}gd}}\right);$$

где: U_∂ есть средняя скорость перемещения донных наносов.

При проведении опытов мы пользовались частицами извести средним диаметром $d_{cp} = 2{,}4$ мм. Применение такого материала для нашего случая имеет следующие преимущества:

1) Известь белого цвета, а те частицы, которые должны быть замечены при исследовании, мы заранее покрасили чернилами. Следовательно, дно лотка было составлено из белого поля песков с отдельными синими песчинками, что позволяло замечать их перемещения без труда.

2) Известь обладает меньшим удельным весом ($\rho_s = 2{,}22$), чем кварцевый песок, поэтому такого размера песок вследствии его легкости можно передвигать при меньшей скорости на лабораторном лотке.

Средняя скорость перемещения песка нами была найдена при помощи кинофильма (кинограмм) с обычной частотой (24 кадр/сек).

Анализ киносъемок показывает, что несмотря на чрезвычайно незакомерный вид движения отдельных частиц наносов, который в значительной степени зависит от их форм и взаимных местных положений, (если средний размер и плотность всех частиц одинаковы), общая средняя скорость при определенном гидравлическом условии существует. Иначе говоря, если мы сумеем исключить все вероятные факты, оказывающие влияние на перемещение отдельных наносов, то общая закономерность всегда может быть найдена.

Полученный нами график, отражающий вышеуказанную критериальную зависимость, подобен расчетному графику для определения коэффициента сопротивления движения пластины.

Имея вышеуказанную критериальную зависимость, мы сможем конкретно определять размер и удельный вес песков для модели.

При расчете модели должны быть заданы следующие элементы:

$$Re_н,\ \left(\frac{h_0}{d}\right)_н,\ \lambda_н.$$

Имея эти значения, при помощи графика, мы сможем определять значение

$$\left(\frac{U\partial}{\sqrt{\frac{\rho_s-\rho}{\rho_s}gd}}\right)_н,$$

соответствующее выше заданным величинам. Так как $\rho_{sн}$ и $d_н$ должны быть известны, следовательно, и можно найти среднюю скорость перемещения наносов $U_{\partial н}$.

Так как подобие перемещений донных наносов есть следствие подобия потоков, следовательно, при моделировании потоков в подвижных руслах мы должны соблюдать тождество значения коэффициента λ.

Если модель неискаженная, то соблюдая одинаковую относительную шероховатость, мы можем находить то значение,

$$\left(\frac{U\partial}{\sqrt{\frac{\rho_s-\rho}{\rho_s}gd}}\right)_м,$$

при котором:

$$\frac{Re_н}{Re_м}=\sigma_e^{3/2}.$$

Так как движение потока в перемещение наносов находятся в одной системе, то отношение скоростей потока и отношение скоростей перемещения наносов должны иметь одно и то же значение:

$$\frac{U_{\partial н}}{U_{\partial м}}=\frac{V_н}{V_м}=\sigma_v=\sigma_e^{1/2};$$

т. е. скорость $U_{\partial м}$ для модели должна быть определена.

При этом мы будем иметь зависимость:

$$\left(\sqrt{\frac{\rho_s-\rho}{\rho_s}gd}\right)_м=\text{const}_1;$$

Согласно вышеизложенному, дальнейшее движение донных наносов должно обеспечивать дальнейшее подобие потоков, следовательно, масштаб модели и масштаб наносов должны быть тождественными при этом мы имеем:

$$\left(\frac{\rho_s-\rho}{\rho_s}\right)_м=\text{const}_2.$$

откуда можно определять соответствующий удельный вес песка для модели.

Пятая глава посвящена общим выводам диссертации, в которой сформированы следующие необходимые и достаточные условия подобия потока:

(А) Русловые потоки, находящиеся в неразмываемых руслах и имеющие плавно-изменяющийся установившийся характер, будут динамически подобны вдоль потока, если распределения скоростей на входных сечениях будут подобными, режимы находятся в квадратичной области и при этом критерий F_r ~~и S_h~~ и коэффициент λ имеют одни и те же числовые значения.

(Б) Русловые потоки, находящиеся в неразмываемых руслах и имеющие плавно-изменяющийся неустановившийся характер, будут динамически подобны во времени и вдоль потока, если распределения скоростей на входных сечениях будут подобными, режимы находятся в квадратичной области и при этом критерии F_r и S_h и коэффициент λ имеют одни и те же числовые значения, в некоторые моменты времени.

(В) Русловые потоки находящиеся в подвижных руслах и имеющие плавно-изменяющийся характер, будут динамически подобны во времени и вдоль потока если распределения скоростей на входных сечениях будут подобными, режимы находятся в квадратичной области и при этом критерий F_r, (а для неустановившегося движения и критерий S_h) и коэффициент λ, определяемый по вышеуказанной зависимости, имеют одни и те же числовые значения.

Л98331 от 21/VII—54 г. Объем 3/4 листа. Тир. 100 экз. Зак. 1526.

Типография Заготиздата. Москва, Шелепиха, 4-я ул., д. 1-а