

15. Опишите принципиальную схему установки ЭГДА. Как строится гидродинамическая сетка с помощью метода ЭГДА и графическим способом?

16. Как определяется фильтрационный расход? Как определяются средняя скорость и гидравлический уклон в области выхода фильтрационного потока в нижний бьеф?

## Глава 29

# ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

## 29.1. Моделирование гидравлических явлений. Законы подобия

Наряду с аналитическими расчетами гидравлических задач широко применяются экспериментальные исследования гидравлических явлений, происходящих при движении жидкости. Сочетание теоретических расчетов и экспериментальных данных позволяет получать надежные и точные результаты для последующего их использования. В ответственных случаях гидравлические исследования сооружений являются обязательными, как это требуется нормативами на проектирование гидротехнических сооружений.

Обычно гидравлические исследования явлений, происходящих в натуральных условиях (в н а т у р е), проводятся в лабораториях на моделях. При этом явление воспроизводится в том или ином масштабе, в соответствии с правилами моделирования, излагаемыми ниже.

В результате исследований на моделях получают поправочные коэффициенты к теоретическим формулам или эмпирические формулы, отражающие зависимости между отдельными параметрами, которые характеризуют изучаемое явление. Различают физическое, аналоговое и численное моделирование.

При физическом моделировании на модели исследуется явление, имеющее такую же физическую природу, что и происходящее в натуре (например, истечение воды через водослив в натуре и на модели).

В последние годы развивается автоматизация лабораторных исследований с помощью ЭВМ и измерительно-управляющих комплексов. Если явления в натуре и на модели имеют различную физическую природу, но описываются аналогичными системами математических уравнений, моделирование называется а н а л о г о в ы м, например изучение напорного движения грунтовых вод с помощью метода ЭГДА (см. гл. 28).

Аналоговое моделирование успешно выполняется и с помощью аналоговых вычислительных машин (АВМ), каждая из которых предназначена (в данном конкретном комплекте устройств) для решения определенного типа задач.

Физическое моделирование можно рассматривать как частный случай аналогового моделирования, когда явления однородные.

Численное моделирование представляет собой решение гидравлических задач с помощью численных методов на ЭВМ без выполнения лабораторных исследований.

Часто исследования проводятся с применением различных видов моделирования (например, совместное использование физического и численного моделирования).

В основе моделирования лежат общие условия механического подобия. Явления будут механически подобны в том случае, если в них одинаково отношение всех геометрических элементов — размеров, расстояний, перемещений, одинаково отношение плотностей, кинематических параметров и сил, действующих в соответственных точках и направлениях.

Для полного механического подобия явлений (потоков) необходимо их геометрическое, кинематическое и динамическое подобие.

Геометрическое подобие служит основой для кинематического и динамического подобия.

Два потока (явления) геометрически подобны, если между их соответствующими линейными размерами существует постоянное отношение

$$l_n/l_m = M_l, \quad (29.1)$$

где  $M_l$  — геометрический линейный масштаб модели, показывающий, во сколько раз геометрические линейные размеры модели изменены по сравнению с натурой; индексом «н» обозначены параметры, относящиеся к натуре, а индексом «м» — относящиеся к модели.

Тогда отношение площадей можно записать так:

$$\omega_n/\omega_m = M_\omega = M_l^2$$

и отношение объемов

$$W_n/W_m = M_W = M_l^3.$$

В геометрически подобной модели русла все размеры, в том числе и высота  $\Delta$  выступов шероховатости, должны быть меньше, чем в натуре, в  $M$  раз, и, следовательно, в подобных потоках относительная шероховатость  $\Delta/R$  такая же, как и в натуре:

$$\Delta/R = \text{idem.}$$

Два потока (явления) кинематически подобны, если (для установившегося движения) траектории, описываемые двумя сходственными частицами обоих потоков, геометрически подобны. В этом случае геометрически подобны и линии токов, проходящие через сходственные точки пространства обоих потоков.

Если некоторая жидкая частица в натуре за интервал времени  $T_n$  проходит участок траектории  $l_n$ , для подобия необходимо, чтобы соответственная жидкая частица на модели проходила за некоторое

(другое) время  $T_m$  отрезок траектории  $l_m$ , геометрически подобный и ориентированный подобно отрезку  $l_n$ . При этом отношение между интервалами времени

$$T_n/T_m = M_t, \quad (29.2)$$

где  $M_t$  — масштаб времени, одинаковый для любой пары сходственных точек обоих потоков.

Скорости сходственных точек двух кинематически подобных потоков должны быть связаны друг с другом следующим отношением:

$$v_n/v = M_v, \quad (29.3)$$

а ускорения — соотношением

$$j_n/j_m = M_j, \quad (29.4)$$

где  $M_v$ ,  $M_j$  — масштабы скорости и ускорения, одинаковые для любой пары сходственных точек. Скорости и ускорения должны быть представлены одинаково ориентированными в пространстве векторами.

Для динамического подобия необходимо, чтобы все силы одинаковой природы, действующие на любую пару сходственных элементов, отличались друг от друга лишь постоянными масштабами (были подобны). Если на некоторый элемент потока в натуре действует сила  $P_n$ , а на сходственный элемент потока на модели действует одинаковая по природе с ней сила  $P_m$ , тогда

$$P_n/P_m = M_p, \quad (29.5)$$

где  $M_p$  — масштаб сил, одинаковый для любой пары сходственных точек.

Потоки жидкости, удовлетворяющие одновременно условиям геометрического, кинематического и динамического подобия, называются гидродинамически подобными потоками, а коэффициенты пропорциональности  $M_l$ ,  $M_t$ ,  $M_v$ ,  $M_p$  и т. д. — масштабными множителями.

Выбор всех масштабных множителей для подобных потоков не является произвольным. Между ними имеется определенная связь.

Как известно, равнодействующую всех сил, действующую на произвольно взятую жидкую частицу, можно выразить через произведение массы на ускорение, причем массу представим как произведение плотности на объем. Тогда равнодействующие силы, действующие на две сходственные жидкие частицы в натуре и на модели, могут быть представлены в виде

$$P_n = \rho_n W_n j; \quad P_m = \rho_m W_m j.$$

Их отношение, выраженное в масштабных множителях, имеет вид

$$P_n/P_m = M_p = M_\rho M_l^3 M_j.$$

Масштабный множитель ускорения можно выразить через масштабные множители  $M_l$  и времени  $M_t$ , а именно

$$M_j = M_l M_t^{-2}.$$

Тогда

$$M_p = M_\rho M_l^4 M_t^{-2}. \quad (29.6)$$

Если в уравнение (29.6) ввести масштабный множитель скорости, то, подразумевая, что  $M_v = M_l/M_t$ , получим

$$M_p = M_\rho M_l^2 M_v^2 \quad (29.7)$$

или

$$M_p M_\rho^{-1} M_l^{-2} M_v^{-2} = 1. \quad (29.8)$$

Это выражение есть закон подобия Ньютона в масштабных множителях.

Заменив масштабные множители соответствующими отношениями из (29.8), получим

$$\frac{P_n}{\rho_n l_n^2 v_n^2} = \frac{P_m}{\rho_m l_m^2 v_m^2}$$

или

$$Ne_n = Ne_m,$$

где  $Ne = \frac{P}{\rho l^2 v^2}$  — критерий Ньютона.

Таким образом, гидродинамическое подобие явлений требует равенства критериев Ньютона, соответствующих модели и натуре.

На основании уравнения (29.8) устанавливается отношение между действующими силами в подобных потоках. Если это отношение известно (оно зависит от природы действующих сил), при выбранном  $M_l$  и при заданных плотностях (в общем случае возможны разные жидкости, например вода и воздух) можно найти  $M_v$ , а затем  $M_t$ ,  $M_j$  и другие масштабные множители.

## 29.2. Критерии гидродинамического подобия

Движение жидкости в природе совершается под действием различных сил: тяжести, давления, трения (сопротивления), поверхностного натяжения, упругости. Влияние указанных сил проявляется в неодинаковой степени в различных явлениях. Одни явления протекают под преобладающим действием сил тяжести и сопротивления, другие — сил тяжести, сопротивления и поверхност-

ного натяжения или только сил тяжести и поверхностного натяжения и т. д.

Условия гидродинамического подобия модели и природы требуют равенства на модели и в натуре отношения всех сил, под действием которых протекает явление. Однако вследствие физических особенностей действующих сил выполнить это условие практически невозможно. Поэтому стремятся установить условия подобия или так называемые критерии подобия для частных случаев, когда в качестве преобладающей выступает какая-нибудь одна из действующих сил. Для обеспечения подобия необходимо также выполнение условий однозначности явлений в натуре и на модели.

В понятие условия однозначности входят геометрические границы потока, основные физические характеристики жидкости, начальные условия и условия на границах потока.

Безразмерные критерии подобия, полученные из параметров, входящих в условия однозначности, являются определяющими критериями подобия применительно к данной рассматриваемой задаче.

**Подобие потоков в случае преобладающего влияния сил тяжести.** В ряде гидравлических явлений преобладающими будут силы тяжести, например при истечении через водосливы и отверстия (при пренебрежимо малом влиянии сил вязкости и поверхностного натяжения).

Если  $P$  — сила тяжести, тогда

$$P = \rho g W.$$

Тогда отношение сил тяжести в натуре и на модели

$$M_P = P_n/P_m = M_\rho M_g M_l^3.$$

С учетом зависимости (29.7) получим

$$M_v^2 M_g^{-1} M_l^{-1} = 1 \quad (29.9)$$

или, заменяя масштабные множители соответствующими отношениями и учитывая, что  $l$  — характерный размер живого сечения,

$$v_n^2/(g_n l_n) = v_m^2/(g_m l_m). \quad (29.10)$$

Безразмерный комплекс  $v^2/gl$  есть критерий Фруда (см. § 7.2), который может служить критерием гравитационного подобия.

Следовательно, геометрически подобные потоки, в которых преобладает действие сил тяжести, можно считать динамически

добными, если будут равны числа Фруда для сходственных сечений обоих потоков:

$$Fr_n = Fr_m \quad \text{или} \quad Fr = \text{idem.}$$

Из (29.9) при  $g_n = g_m$ , т. е. при  $M_g = 1$ , следует

$$M_v = M_l^{0.5} \quad (29.11)$$

или

$$v_n = v_m M_l^{0.5}. \quad (29.12)$$

Отношение расходов жидкости в натуре и на модели при  $Fr = \text{idem}$

$$\frac{Q_n}{Q_m} = \frac{\omega_n v_n}{\omega_m v_m} = M_l^2 M_l^{0.5} = M_l^{2.5}. \quad (29.13)$$

Расход на модели при масштабе длин  $M_l$  должен быть в  $M_l^{2.5}$  раз меньше, чем в натуре.

Масштабный множитель для времени

$$M_t = M_l M_v^{-1} = M_l M_l^{-0.5} = M_l^{0.5}. \quad (29.14)$$

Следовательно, время протекания процесса в натуре будет  $\sqrt{M_l}$  раз больше, чем на модели.

Выше исходили из полного геометрического подобия природы и модели, в том числе и подобия граничных условий ( $\Delta/R = \text{idem}$ ).

**Подобие потоков при преобладающем влиянии сил сопротивления.** К таким явлениям относится, например, движение в реках, каналах, трубах. Под силами сопротивления понимаются силы как вязкостного, так и турбулентного сопротивления.

В общем виде силы сопротивления, проявляющиеся в потоке жидкости, выражаются как

$$T = \tau_0 \chi^l = \rho g R J \chi^l = \rho g \omega J l, \quad (29.15)$$

где  $\tau_0$  — касательное напряжение на стенке;  $\chi$  — смоченный периметр;  $l$  — длина рассматриваемого участка русла;  $J$  — гидравлический уклон.

Перепишем (19.15) в масштабных коэффициентах с учетом того, что  $M_\omega = M_l^2$  и для силы  $T$  справедлива формула (29.7). Тогда получим

$$M_J = M_v^2 M_l^{-1} M_g^{-1}. \quad (29.16)$$

Как известно, при любом режиме движения жидкости

$$J = \frac{v^2}{C^2 R} = \frac{v^2 \lambda}{8gR},$$

поэтому

$$M_J = M_v^2 M_C^{-2} M_R^{-1} = M_v^2 M_\lambda M_g^{-1} M_R^{-1}. \quad (29.17)$$

Сопоставляя (29.16) и (29.17) и полагая при геометрическом подобии  $M_R = M_l$ , находим  $M_\lambda$  или  $M_C = 1$ .

Условием гидродинамического подобия в этом случае является неизменность коэффициента Дарси  $\lambda$  (или коэффициента Шези  $C$ ):

$$\lambda = \text{idem} \text{ или } C = \text{idem}$$

или

$$\lambda_n = \lambda_m \text{ и } C_n = C_m.$$

Рассмотрим частный случай: движение в натуре турбулентное в квадратичной области сопротивления. В этом случае  $\lambda$  и  $C$  зависят только от относительной шероховатости русла  $\Delta/R$  и не зависят от числа  $Re$ . Тогда гидродинамическое подобие ( $\lambda_n = \lambda_m$ ) будет обеспечено, если  $(\Delta/R)_n = (\Delta/R)_m$ , что будет достигнуто при точном геометрическом подобии модели и природы.

Отметим, что если при создании модели оценивать шероховатость русла не по относительной шероховатости  $\Delta/R$ , а по коэффициенту шероховатости  $n$ , то из формулы

$$C = \frac{1}{n} R^y$$

получим

$$M_C = M_l^y / M_n,$$

но так как при  $M_g = 1$  и  $M_C = 1$ , то

$$M_n = M_l^y.$$

Следовательно, если коэффициент шероховатости в натуре  $n_n$ , то в геометрически подобной модели коэффициент шероховатости  $n_m$  должен быть меньше в  $M^y$  раз, т. е.

$$n_m = n_n M_l^{-y}. \quad (29.18)$$

С учетом (29.7) и (29.16), считая  $M_g = 1$ , найдем

$$M_J = M_v^2 M_l^{-1} M_g^{-1} = 1$$

или

$$J_m = J_n.$$

### 29.3. Гидравлика и охрана внешней среды

Рассмотрим некоторые гидравлические явления и процессы с точки зрения задач охраны окружающей человека природной (внешней) среды. Краткое перечисление явлений, приводимое ниже, не преследует цели изложить способы решения, а лишь направлено на описание их с тем, чтобы привлечь внимание читателей. Тем более, что в ряде случаев общепризнанные и однозначные решения пока отсутствуют.

**Распространение стратифицированных потоков.** При распространении втекающей жидкости в водоемах, водохранилищах, морях и водотоках часто наблюдаются случаи, когда плотность втекающей жидкости может отличаться от плотности жидкости в водоеме или водотоке. В таких случаях говорят о наличии плотностной стратификации. Примерами могут служить: растекание пресных речных вод в море, более теплой струи после ТЭС или АЭС (струя вытекает в пруд-охладитель или в водохранилище), растекание более холодной струи в водоеме или более соленой струи (дренажно-коллекторных вод) в реке или водохранилище. К рассматриваемым явлениям относятся также случаи распространения сбросных вод в реках и водохранилищах, а также в морях, когда различия плотностей втекающей жидкости и «принимающей» жидкости обусловлено не только различием солености или температур, но и различием в концентрации взвесей, содержащихся в сбрасываемой воде.

Это могут быть также случаи перемещения придонного «плотностного» или «мульевого» потока, характеризующегося высокими значениями концентрации наносов, в водохранилищах и отстойниках; движение и перемешивание слоев воды с различной температурой и плотностью в зимних условиях в водохранилищах и реках и некоторые другие. При применении средств в гидромеханизации, в том числе при намыве пульпы в воду, а также при гидравлических промывках донных отложений в реках и водохранилищах концентрация частиц грунта в воде повышается. Распространение так называемых высокомутных факелов нарушает нормальную жизнь водотоков.

В ряде случаев движение поступающей в водоем или водоток жидкости рассматривается как гидравлическая струя с теми или иными особенностями, например, всплывающая или не всплывающая струя, струя в спутном или встречном потоке. При этом струя, выходящая из водовыпуска, может искривляться как в плане, так и по вертикали, быть свободной, полуограниченной в пространстве, затопленной, круглой или плоской и т. п.

Расчеты профилей осредненных скоростей и характеристик турбулентности, распределение температур, солености и концентрации примесей по длине и в поперечном сечении струй способствуют более обоснованному проектированию сооружений.

**Прогнозирование качества воды.** Сброс загрязненных и сточных вод в водотоки и водоемы требует обеспечить прогнозирование качества воды во времени и в пространстве. Эти расчеты выполняются на основе уравнений движения, неразрывности (сохранения массы), сохранения импульса, а с добавлением уравнений диффузии (в большинстве случаев — турбулентной диффузии) и других специфических уравнений и соотношений, в том числе уравнений сохранения веществ примеси. Их совместное рассмотрение позволяет прогнозировать как принимаемые решения, так и концентрации взвешенных частиц, поступающих в водоток или водохранилище со сточными водами, и ее изменения в водном пространстве, а также говорить о таких специфических, но очень важных вопросах, как изменение биомассы фитопланктона, содержания растворенного в воде кислорода, температуры воды, концентрации углерода, азота и некоторых других элементов в воде. При расчетах может также учитываться так называемое вторичное загрязнение воды от «грязных» донных отложений, например, в водохранилище.

Некоторые расчеты (например, распространение примесей ниже выпуска сточных вод по течению водотока) также производятся на основе рассмотренной распространения струи в потоке.

**Русловые процессы.** Неблагоприятные воздействия последствий изменения русловых процессов на внешнюю среду (местность) заставляет исследователей и проектировщиков обращать особое внимание на эти процессы. К ним относятся общие и местные деформации русл ниже гидротехнических сооружений, особенно ниже плотин с водохранилищами. Так, если на выходе из водосбросов плотин вода имеет меньшую концентрацию наносов, чем в бытовых условиях, то это сказывается на изменении русловых процессов в нижних бьефах гидротехнических сооружений. В том числе происходят плановые переформирования русл, изменяются очертания берегов. Все это должно учитываться при проектировании тех или иных объектов в зонах, прилегающих к отводящему от гидротехнического сооружения руслу и др.

Существенное значение имеет правильное проектирование каналов, особенно с достаточно большими расходами воды, т. е. крупных каналов с учетом возможных русловых процессов в них. В неудачно запроектированных каналах развитие русловых процессов может привести к их последующему обмелению и расширению, меандрированию, а следовательно и к нарушению нормальной работы дорог и сооружений, расположенных вблизи каналов. Правильный учет и прогноз русловых процессов позволит обеспечить также надежную работу водозаборных сооружений на реках.

На состояние речных долин сильно влияют паводки, их пропуск по пойме, в том числе при прохождении части расхода воды по руслу, а части расхода по пойме в обход водопропускных гидротехнических сооружений, расположенных в русле. Деформации поймы и русла, возможные нарушения работы сооружений на пойме (например, опоры линий электропередач, мосты, дороги и др.) приводят к необходимости учета русловых процессов и выполнения гидравлических расчетов. На практике осуществляются различные противопаводковые охраняемые мероприятия, в том числе устройство эффективно работающих струенаправляющих дамб, очертания которых определяются гидравлическим расчетом.

Развитие строительства и промышленности строительных материалов привело, особенно за последние годы к заметному увеличению добычи нерудных материалов (песка, гравия) в руслах рек. В результате этого образовались подводные донные выемки в реках — карьеры, оказывающие заметное влияние на изменение кинематических характеристик потока, русловой процесс и уровень режим. Иногда отмечаются существенные понижения уровней свободной поверхности воды, что приводит к заметным изменениям режима грунтовых вод на прилегающих к реке территориях.

Санитарные и другие попуски воды из водохранилищ, часто проходящие по обмелевшим или практически сухим руслам в нижних бьефах сооружений, оказывают воздействие на берега русл и могут привести к их переформированиям, а впоследствии и к опасным нарушениям их устойчивости. В связи с этим задачи расчета движения воды при указанных попусках, определения изменения скоростей и глубин во времени существенны для прогнозирования состояния отводящих русл рек и прилегающих территорий.

В этом случае представляют интерес и задачи о прорыве плотины и об обрушении значительных масс грунта горных пород в водохранилища. Прорыв плотины сопровождается прохождением по нижележащему руслу мощного потока, состоящего из смеси воды, грунтов и камней. При обрушении грунтовых массивов в водохранилище возникают волны большой высоты, что приводит к переливу через гребень земляной или каменно-набросной плотины, к разрушению всей плотины или ее части. И опять в нижний бьеф поступает водо-грязе-каменная смесь, движущаяся с очень большой скоростью. В этих случаях говорят о прохождении селя (селевого потока). Аналогичное явление, определяемое нормативными документами как «стремительный поток большой разрушительной силы, состоящий из

смеси воды и рыхлообломочных пород» может возникнуть и в результате ливней в бассейнах горных рек.

Селевые потоки подразделяются на несвязные и связанные в зависимости от преобладающих в их составе массы грунтов и соотношения сил сцепления между взвешенными частицами. По составу различают селевые потоки водно-песчаные, водно-каменные, грязе-каменные, камне-грязевые и др. При движении селей наблюдают ламинарный, турбулентный и структурный режимы движения. Последний характерен для неньютоновских жидкостей с определенными значениями консистенции твердых составляющих, плотности, вязкости и начального касательного сопротивления селевой массы.

При гидравлических расчетах рассматриваемых явлений определяют средние скорости и расход селевого потока. Обязательно рассчитываются селепропускные сооружения под дорогами, сооружениями или селезащитные сооружения, служащие для задержания или соответствующего направления селевого потока, а также для защиты берегов и других сооружений (дамбы и пр.). Правильно рассчитанные сооружения уменьшают опасность воздействия селевых потоков.

**Процессы водной эрозии почв** являются серьезной проблемой. Они происходят как под воздействием природных дождей и ливней, так и под воздействием дождевых капель, создаваемых дождевальными машинами. Расчеты процессов, происходящих при эрозии, прогнозирование размеров ее, определение безопасных для почвы режимов работы дождевальных машин, размеров и интенсивности выпадающих дождевальных капель, расчеты противозерозионных сооружений — все это важные задачи охраны почвы при воздействии на нее воды.

**Переработка берегов** водотоков, прудов, водохранилищ и морей под воздействием волн и вдольбереговых течений представляет также серьезную опасность для природной среды. Определение скоростей волнового и поступательного потоков, расхода донных и взвешенных наносов, скорости деформации берегов в плане, особенно разрушения отмелей и пляжных участков — все это позволяет более обоснованно намечать берегоохраняющие и берегоукрепительные мероприятия.

**Неустановившееся движение жидкости в трубопроводах и открытых руслах.** В этом случае могут возникать опасные явления (гидравлические удары), которые могут сопровождаться разрывами труб водо-, газо- и нефтепроводов, а также волны достаточно большой высоты в руслах. При разрывах трубопроводов, давления в которых достигают значительных величин, наблюдаются аварийные ситуации и серьезные загрязнения прилегающих территорий. В каналах и реках могут наблюдаться прорывы береговых откосов и дамб, ограждающих русла, с последующим затоплением территорий.

**Фильтрация воды из каналов и водохранилищ** — наиболее широко обсуждаемый вопрос в последнее время. В результате фильтрации теряется значительная часть воды, что приводит к подтоплению и даже заболачиванию земель. Если грунтовые воды имеют высокое содержание солей, то смыкание воды, профильтровавшейся из каналов и водохранилищ, с грунтовыми водами приводит к засолению земель и резко ухудшает условия их использования для земледелия. При рассмотрении этих вопросов с целью предохранения земель от подтопления и засоления знание законов гидравлики крайне необходимо.

**Рыбозащитные сооружения.** В гидротехническом строительстве важное значение приобретает создание благоприятных условий для жизни рыб. Здесь имеется в виду как обеспечение защиты рыб от гибели и повреждений в водозаборах насосных станций и других гидротехнических сооружениях, так и создание оптимальных для каждого вида рыб скоростей водного потока в пределах рыбопропускных сооружений и на подходах к ним.

**Гидравлика и медицина.** Движение жизнеобеспечивающих жидкостей в теле человека происходит также по законам гидравлики. Наблюдаются

ламинарный (в капиллярах и малых сосудистых каналах) и турбулентный (в более крупных проводящих сосудах) режимы движения. К сожалению, многие гидравлические явления, например, повышение и понижение давления при течении крови в сосудах; гидравлические удары, приводящие к разрывам сосудов и внутренних органов, — сопутствуют человеку. Поэтому серьезное изучение гидравлических явлений может служить и охране здоровья людей.

Все перечисленные задачи охраны природной (внешней) среды, а также многие другие в подавляющем большинстве случаев решаются на основе положений гидравлики, изложенных в данной книге.

## 29.4. Контрольные вопросы

1. Каковы основные черты физического, аналогового и численного моделирования?
2. Какие явления называются механически подобными?
3. Что такое геометрически подобные потоки?
4. Каковы соотношения геометрических параметров в этих потоках?
5. Как охарактеризовать кинематически подобные потоки? Какие соотношения для скорости и ускорений, а также времени имеются в этих потоках?
6. Какие потоки называются динамически подобными и гидродинамически подобными?
7. Что такое масштабные множители? Запишите закон подобия Ньютона в масштабных множителях.
8. Что такое критерии подобия и условия однозначности?
9. Какими соотношениями характеризуется подобие потоков при преобладающем влиянии сил тяжести?
10. Какими соотношениями характеризуется подобие потоков при преобладающем влиянии сил сопротивления?

$h_{kp\ r}$	$h_{kp.\ c/r}$	$h_{kp\ r}$	$h_{kp.\ c/r}$	$h_{kp\ r}$	$h_{kp.\ c/r}$
0,00	0,00	0,42	0,425	0,84	0,735
0,02	0,04	0,44	0,440	0,86	0,745
0,04	0,07	0,46	0,460	0,88	0,760
0,06	0,095	0,48	0,475	0,90	0,775
0,08	0,125	0,50	0,490	0,92	0,785
0,10	0,145	0,52	0,505	0,94	0,800
0,12	0,165	0,54	0,520	0,96	0,815
0,14	0,185	0,56	0,535	0,98	0,830
0,16	0,205	0,58	0,550	1,00	0,840
0,18	0,225	0,60	0,565	1,02	0,855
0,20	0,245	0,62	0,580	1,04	0,865
0,22	0,260	0,64	0,595	1,06	0,880
0,24	0,280	0,66	0,615	1,08	0,895
0,26	0,295	0,68	0,630	1,10	0,910
0,28	0,315	0,70	0,645	1,12	0,920
0,30	0,330	0,72	0,660	1,14	0,930
0,32	0,350	0,74	0,670	1,16	0,945
0,34	0,365	0,76	0,685	1,18	0,960
0,36	0,380	0,78	0,695	1,20	0,970
0,38	0,395	0,80	0,705	1,22	0,985
0,40	0,410	0,82	0,720	1,24	0,995