

Таким образом, наблюдения показали, что размыв берегов и перенос продуктов размыва происходит под действием волновых течений, а вдольбереговые ветровые активного влияния на них не оказывают.

ЛИТЕРАТУРА

1. Караушев А.В. Неустановившиеся и стационарные ветровые течения и нагоны в водоемах. — Тр. ГГИ. Л., 1952, вып. 35 (89).
2. Богословский Б.Б. Озероведение. — М., 1960.
3. Богачев А.Г., Филатова Т.М. Течения в мелководных нестратифицированных водоемах (на примере Чудско-Псковского озера). — Тр. VI Всесоюз. гидролог. съезда, т. 5. Гидрология озер, водохранилищ и устьев рек. Л., 1975.
4. Гидрология озер Воже и Лача (в связи с переброской северных вод в бассейн р. Волги). — Л., 1979.
5. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. — Л., 1973, вып. 7, ч. I.
6. Широкое В.М. Влияние гидрометеорологических факторов на формирование берегов и ложа Куйбышевского водохранилища. — Тр. 7-го Байкальск. науч.-координац. совещ. по изучению берегов водохранилищ. Т. 1. М., 1961.

УДК 628.152

В.П.СТАРИНСКИЙ, канд. техн. наук, доц.

ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ВОДОПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ МЕТОДОМ БАЛАНСА РАСХОДОВ ВОДЫ В УЗЛАХ

Гидравлический расчет водопроводных сетей является одной из наиболее сложных и трудоемких операций при проектировании. Он ставит своей задачей найти для заданной схемы сети и величин узловых и сосредоточенных отборов Q_{yi} и Q_{ci} значения расходов воды Q_{ij} в линиях и наметить стандартные диаметры d_{ij} труб этих линий, при которых как для сети в целом, так и для отдельных ее узлов и контуров соблюдаются два известных условия Кирхгофа:

$$\begin{aligned} p_i \\ \sum_{j=1} Q_{ij} - Q_{yi} - Q_{ci} = 0; \end{aligned} \quad (1)$$

(i = 1, 2, 3, ..., m - 1)

$$\begin{aligned} p_k \\ \sum_{L_k} \Delta h_{ij} = 0, \end{aligned} \quad (2)$$

(k = 1, 2, 3, ..., n),

где Q_{ij} — расходы воды в отдельных линиях сети; Q_{yi} и Q_{ci} — соответственно узловые и сосредоточенные отборы (или подачи с противоположными знаками) воды в узлах; p_i — число водопроводных линий в рассматриваемом i-ом узле сети; m — число узлов в сети; Δh_{ij} — потери напора в отдельных водопроводных линиях; p_k — число линий, входящих в рассматриваемый контур сети; k — число рассматриваемых контуров или колец сети.

Число расчетных уравнений вида (1) и (2), из которых можно определить искомые неизвестные, равно $n+m-1 = p$, где p — общее число линий в

сети. Число же искомым неизвестных равно $2p$, т.е. оно в два раза больше числа расчетных уравнений. Поэтому рассматриваемую задачу принципиально можно решить лишь в том случае, если половиной каких-либо неизвестных предварительно задаться. При этом полученное решение задачи будет носить частный характер. А чтобы оно было оптимальным или близким к нему, предварительно принимаемые неизвестные назначаются оптимальным образом. Традиционно в качестве этих неизвестных принимают расходы воды Q_{ij}^0 в линиях сети, назначая в ней предварительное потокораспределение таким образом, чтобы выполнить условие (1). Затем для этих расходов принимают экономически наивыгоднейшие диаметры линий d_{ij}^0 и находят для них соответствующие потери напора Δh_{ij}^0 . После этого проверяют соблюдение условия (2). Если оно не соблюдается, принятое предварительное потокораспределение в сети корректируется путем проведения в ее основных контурах или кольцах некоторых увязочных расходов воды ΔQ_k , чтобы разгрузить их перегруженные и догрузить недогруженные линии. С учетом этих корректировок находят новые значения Q_{ij}^1 в линиях, уточняют при необходимости их диаметры d_{ij}^1 и определяют новые значения потерь напора Δh_{ij}^1 . Затем снова проверяют соблюдение условия (2). Такие операции продолжают до тех пор, пока оно не будет выполнено с необходимой точностью. Постоянная проверка соблюдения условия (1) необязательна, если оно выполнено на стадии назначения предварительного потокораспределения. Объясняется это тем, что проведение увязочных расходов в контурах сети не нарушает принятого ранее баланса расходов воды в узлах. Оно только корректирует отдельные составляющие этого баланса.

Для облегчения этих многократно повторяющихся однотипных расчетов широко используются ЭВМ.

Однако из изложенного следует, что гидравлический расчет водопроводных сетей по изложенной схеме, несмотря на полученные в последнее время новые предложения по его упрощению [1, 2, 3 и др.], остается еще недостаточно совершенным. Отсюда становится понятным постоянное стремление специалистов к совершенствованию методов расчета сети. В частности, в качестве одного из путей такого совершенствования заслуживает внимание предложение, изложенное в [4]. Однако в отношении реализации задачи расчета сети оно, как и все остальные, связано с большими затруднениями в определении гидравлического сопротивления водопроводных линий.

В настоящей работе предлагается более простой и надежный, по мнению автора, способ решения рассматриваемой задачи: для водопроводной сети в качестве исходной информации задаются не только схемой сети, ее узловыми и сосредоточенными расходами и предварительным потокораспределением, но и предполагаемыми или желаемыми пьезометрами P_i в узлах. Последние намечают из топографических особенностей территории обслуживаемого сетью объекта, этажности жилой застройки и других аналогичных факторов, определяющих необходимые напоры в сетях. Их можно принять также и исходя из предполагаемых или желаемых гидравлических уклонов пьезометрических линий в элементах сети.

Увязку водопроводной сети предусматривается осуществлять с помощью требований условий (1), т.е. по методу баланса расходов воды в уз-

лах сети, а не по условию (2), как это принято в большинстве известных и широко применяемых методов расчета.

Действительно, если в любой водопроводной сети задаться произвольными пьезометрами Π_i^0 в узлах, то при полном использовании разности этих пьезометров $\Delta \Pi_{ji}^0 = \Pi_j^0 - \Pi_i^0$ на преодоление сопротивления при перемещении в них расходов воды Q_{ji} ; условие (2) будет соблюдено в любых случаях, т.е. при любых значениях величин Π_i^0 и Π_j^0 в узлах. Что же касается условия (1), то оно будет иметь место лишь при определенном сочетании Π_i^0 и Π_j^0 , которое и необходимо найти при расчете водопроводной сети с предварительно намеченными величинами Q_{ij}^0 , d_{ji} и Π_i^0 .

Основываясь на известных законах гидравлики водопроводных труб, для каждой линии сети можно написать, что

$$\Pi_j - \Pi_i = \Delta h_{ji} = s_{oji} l_{ji} Q_{ji}^\beta = S_{ji} Q_{ji}^\beta, \quad (3)$$

где Π_i и Π_j — пьезометры в рассматриваемом и соседнем с ним узле сети; s_{oji} — коэффициент удельного гидравлического сопротивления соединяющей эти узлы линии; l_{ji} — длина рассматриваемой линии; Q_{ji} — расход протекающей по ней воды; β — показатель степени, принимаемый в пределах 1,8–1,9 в зависимости от типа используемых труб; S_{ji} — коэффициент полного гидравлического сопротивления линии.

Из выражения (3) легко найти, что расходы воды в линиях сети будут равны

$$Q_{ji} = \left(\frac{\Pi_j - \Pi_i}{s_{oji} l_{ji}} \right)^{\frac{1}{\beta}} = \left(\frac{\Pi_j - \Pi_i}{S_{ji}} \right)^{\frac{1}{\beta}}. \quad (4)$$

Если выражение (3) представить в виде

$$\Pi_j - \Pi_i = s_{oji} l_{ji} Q_{ji}^{\beta-1} Q_{ji} = R_{ji} Q_{ji}, \quad (5)$$

то из него следует, что

$$Q_{ji} = \frac{\Pi_j - \Pi_i}{R_{ji}} = \rho_{ji} (\Pi_j - \Pi_i), \quad (6)$$

где

$$\rho_{ji} = \frac{1}{R_{ji}} = \frac{1}{s_{oji} l_{ji} Q_{ji}^{\beta-1}}. \quad (7)$$

Величины $R_{ji} = s_{oji} l_{ji} Q_{ji}^{\beta-1}$ и $\rho_{ji} = 1/R_{ji}$ представляют собой соответственно полное гидравлическое сопротивление и водопроводимость линии.

На основании приведенных выражений условие (1) для сети можно представить в виде

$$\sum_{j=1}^n \rho_i \left(\frac{\Pi_j - \Pi_i}{s_{oji} l_{ji}} \right)^{\frac{1}{\beta}} - Q_{yi} - Q_{ci} = 0 \quad (8)$$

или

$$\sum_{j=1}^{P_i} \rho_{ji} (\Pi_j - \Pi_i) - Q_{yi} - Q_{ci} = 0. \quad (9)$$

$$(i = 1, 2, 3, \dots, m-1)$$

Решая полученную систему уравнений относительно Π_i и Π_j , можно найти те искомые значения пьезометра в узлах сети, при которых одновременно удовлетворяются условия Кирхгофа (1) и (2), т.е. имеет место динамическое равновесие сети. При этом из $m-1$ уравнений определяют $m-1$ значений узловых пьезометров сети, так как величина Π_i в ее диктующей точке всегда будет задана. Поэтому в рассматриваемой постановке задача гидравлического расчета сети вполне конкретна и разрешима. Однако ее реализация с использованием системы уравнений (8) или (9) и применением известных математических способов их решения все же затруднительна ввиду нелинейности (8) и зависимости коэффициентов ρ_{ji} от Q_{ji} и определяющих их искомых величин Π_i в (9).

В данной работе предлагается более простой способ решения задачи, основанный на последовательной и целенаправленной корректировке принятых ранее узловых пьезометров Π_i^0 . Суть его состоит в том, что если при принятых Q_{ji}^0 , d_{ji}^0 и Π_j^0 условие (1) для рассматриваемого i -го узла сети не выполняется и уравнение (9) или условие (1) для него получает вид

$$\sum_{j=1}^{P_i} \rho_{ji}^0 (\Pi_j^0 - \Pi_i^0) - Q_{yi} - Q_{ci} = \Delta Q_i^0, \quad (10)$$

то введением соответствующей поправки $\Delta \Pi_i^0$ к пьезометру Π_i^0 рассматриваемого узла можно достичь такого положения, при котором условие (1) в данном узле будет обеспечено. Это означает, что путем введения соответствующей поправки $\Delta \Pi_i^0$ к пьезометру Π_i^0 мы можем получить условие

$$\sum_{j=1}^{P_i} \rho_{ji}^0 [\Pi_j^0 - (\Pi_i^0 + \Delta \Pi_i^0)] - Q_{yi} - Q_{ci} = 0. \quad (11)$$

Из этого выражения следует, что поправка $\Delta \Pi_i^0$

$$\Delta \Pi_i^0 = \frac{\sum_{j=1}^{P_i} \rho_{ji}^0 (\Pi_j^0 - \Pi_i^0) - Q_{yi} - Q_{ci}}{\sum_{j=1}^{P_i} \rho_{ji}^0} = \frac{\Delta Q_i^0}{\sum_{j=1}^{P_i} \rho_{ij}^0}. \quad (12)$$

Действительно, если по выражениям (8), (9) или (10) разбаланс расходов в рассматриваемом узле получился положительным, то это значит, что при принятом Π_i^0 и намеченных диаметрах d_{ji}^0 водопроводных линий приток воды к узлу больше оттока. Чтобы их сбалансировать, необходимо увеличить на величину $\Delta \Pi_i^0$ пьезометр Π_i^0 . Тогда приток воды к рассматриваемому узлу вследствие уменьшения гидравлического уклона в его подводящих линиях

уменьшится, а отток из-за возрастания гидравлического уклона в отводящих линиях — увеличится.

Найденная по формуле (12) величина ΔP_i^0 дает возможность получить сбалансированное решение данной задачи. При этом величину P_i^0 необходимо корректировать до тех пор, пока относительное значение разбаланса расходов воды ϵ_i в узле не достигнет допустимой величины, т.е. пока не будет соблюдено условие

$$\epsilon_i = \frac{|\Delta Q_i^N|}{\rho_i \sum_{j=1}^N |Q_{ji}^N| + |Q_{yi}| + |Q_{ci}|} \leq [\epsilon], \quad (13)$$

где N — порядковый номер корректировки первоначального значения пьезометров P_i^0 ; Q_i^N и ΔQ_i^N — расходы воды в линиях сети и абсолютная величина разбаланса расходов воды в узлах, соответствующие этому номеру корректировки P_i^0 ; $[\epsilon]$ — допустимая относительная величина разбаланса расходов воды в узлах, обычно равная 0,025.

Аналогичные операции по корректировке предварительно принятых пьезометров производят для всех узлов сети и тем самым добиваются ее динамического равновесия.

Гидравлический расчет водопроводной сети по рекомендуемому методу осуществляется по следующему алгоритму:

1. Для рассматриваемой схемы водопроводной сети, ее узловых и сосредоточенных отборов (подач) Q_{yi} и Q_{ci} намечают предварительное потокораспределение Q_{ji}^0 и величину желаемых пьезометров P_i^0 в узлах. При этом предварительное потокораспределение может приниматься приближенно, при примерном соблюдении условия (1).

2. По принятому предварительному потокораспределению в сети намечают необходимые экономически наиболее выгодные диаметры d_{ji}^0 , определяют соответствующие им коэффициенты гидравлического сопротивления S_{ji}^0 и проводимости ρ_{ji}^0 всех линий сети. При этом учитывают возможные переброски расчетных расходов воды с одной линии на другую во время возникновения в сети вероятных аварийных ситуаций, а также при необходимости пропуска по ним расчетных пожарных расходов воды.

3. Используя принятые d_{ji}^0 , S_{ji}^0 и P_i^0 , определяют по формуле (4) фактические расходы воды в линиях Q_{ji}^{01} и с помощью (8) находят величины разбалансов ΔQ_i^0 расходов воды в узлах.

4. По формуле (13) устанавливают относительную величину разбалансов ϵ_i расходов воды в узлах и сопоставляют ее с допустимым значением.

5. В узлы, для которых условие (13) не выполняется, вводят поправки ΔP_i^0 к их первоначальным пьезометрам, определяемые по формуле (8).

6. По полученным уточненным значениям пьезометров $P_i^1 = P_i^0 + \Delta P_i^0$ с помощью выражения (4) находят новые значения расходов воды Q_j^1 в ли-

ниях, по формуле (8) определяют соответствующие им значения ΔQ_1^1 , устанавливают, насколько ΔQ_1^1 удовлетворяет условию (13), и при необходимости продолжают дальнейшее уточнение решения задачи по изложенному алгоритму, пока во всех узлах сети не будет соблюдаться указанное условие.

При этом найденные в начале расчета величины $\sum_{j=1}^m \rho_{ji}^0$ для отдельных узлов с изменением Q_{ji} в их линиях не корректируются, так как в конечном счете они изменяются незначительно и особого влияния на процесс увязки сети не оказывают. Корректируются эти величины только в том случае, если в процессе расчета сети меняются диаметры некоторых ее линий.

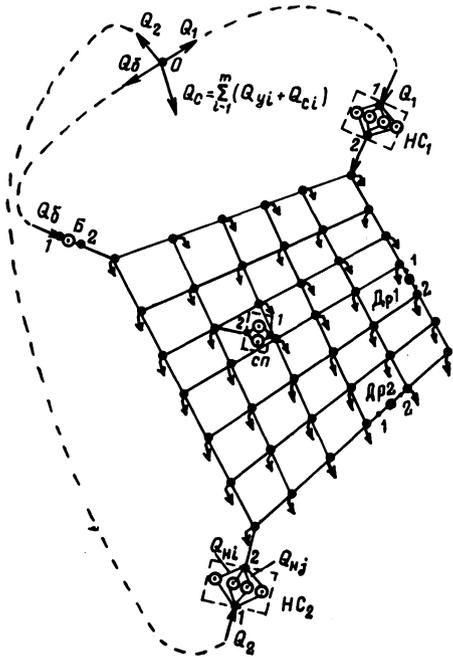


Рис. 1. Расчетная схема питания и отбора воды сети.

Процесс такого расчета является быстроходящимся и весьма устойчивым. Кроме того, он легко контролируется и просто переводится на язык любой ЭВМ.

Важным достоинством данного метода гидравлического расчета сетей является простота подготовки исходных данных и описания водопроводных сетей. С его помощью весьма удобно производить гидравлические расчеты любых водопроводных сетей, включая плоские и пространственные кольцевые сети с фиксированными и нефиксированными подачами и отборами воды, а также сети, имеющие внутренние повысители напора и дроссели. Для этого достаточно каждое из перечисленных устройств представить, как это показано на рис. 1, двумя отдельными точками, характеризующими вход и выход. Насосные станции и повысители напора рекомендуется представлять в виде суммы расходов установленных на них насосных агрегатов. Все указанные

точки рассматриваются как обычные узлы сети. Исходя из этого величина подачи воды насосными станциями и повысителями напора определяются по формуле

$$Q_z = \sum_{i=1}^{n_i} Q_{zi} + \sum_{j=1}^{n_j} Q_{zj} = \sum_{i=1}^{n_i} \sqrt{\frac{\Pi_{oi} - \Pi_{z2}}{S_{Hi} + S_{Vi}}} + \sum_{j=1}^{n_j} \sqrt{\frac{z_{Hi} + \beta_j^2 \Pi_{oj} - \Pi_{z2}}{S_{Hj} + S_{Vj}}}, \quad (14)$$

где Q_{zj} и Q_{zi} — подача воды в сеть соответственно качественно регулируе-

мыми и нерегулируемыми насосами; n_j и n_i — число этих насосов, включенных на совместную работу для подачи в сеть расхода воды Q_z ; H_{oj} и P_{oi} — напоры и пьезометры соответственно регулируемых и нерегулируемых насосных агрегатов станций, развиваемые ими при работе на закрытую задвижку; P_{z2} — пьезометр на выходе из рассматриваемой насосной станции; S_{Hj} и S_{Hi} — коэффициенты внутреннего гидравлического сопротивления соответственно регулируемых и нерегулируемых насосов; S_{Bj} и S_{Bi} — коэффициенты гидравлического сопротивления внутристанционных трубопроводов для этих типов насосов; $\beta_j = \frac{\omega_{jx}}{\omega_{jo}}$ — коэффициент относительного изменения числа оборотов рабочих колес регулируемых насосных агрегатов рассматриваемых станций; z_{Hj} — отметка уровня воды в резервуарах насосных станций с регулируемыми агрегатами.

При определении Q_z , Q_{zi} и Q_{zj} величины P_{oi} и H_{oj} принимаются постоянными, и поправки ΔP_i к ним не вводятся. Значения Q_z , Q_{zi} и Q_{zj} регулируются путем изменения количества работающих насосных агрегатов и числа оборотов рабочих колес регулируемых насосов.

Подача воды в сеть водонапорными башнями определяется по формуле

$$Q_6 = \left(\frac{P_{об} + \Delta H_6 - P_{62}}{S_{вб}} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (15)$$

где $P_{об}$ — пьезометр расчетной высоты башни (до ее днища); ΔH_6 — величина наполнения баков башни; P_{62} — пьезометр в точке подсоединения башни к горизонтальному участку ее линии подключения к водопроводной сети; $S_{вб}$ — коэффициент гидравлического сопротивления вертикальных линий подключения водонапорной башни к сети.

По этой же формуле определяются и отборы воды башнями в тот период, когда они заполняют свои баки и выступают в качестве нефиксированных отборов воды. Величина P_{62} в этом случае должна быть больше суммы $P_{об} + \Delta H_6$.

Понижение напора в дросселях определяется по формуле

$$\Delta H_{др} = P_{др.1} - P_{др.2} = S_{др} Q_{др}^2 \quad (16)$$

где $P_{др.1}$ и $P_{др.2}$ — пьезометры на входе в дроссель и выходе из него; $S_{др}$ — коэффициент гидравлического сопротивления дросселя; $Q_{др}$ — расход воды, протекающей через дроссель.

Поскольку во всех случаях для сети в целом сумма подач воды должна быть равна сумме ее отборов, то при гидравлическом расчете сети (а в этом случае уже при расчете системы подачи и распределения воды) вводится некоторая дополнительная контрольная точка (названная Л.Ф.Мошным "фиктивным узлом сети"), в которой должно соблюдаться условие

$$\sum_{z=1}^{n_z} Q_z = \sum_{i=1}^m Q_{отб.i} \quad \text{или} \quad \sum_{z=1}^{n_z} Q_z - \sum_{i=1}^m Q_{отб.i} = 0. \quad (17)$$

Расчет осуществляется табличным методом. Он может выполняться и на самой расчетной схеме сети, подобно способу М.М.Андряшева при расчете сетей методом баланса потерь напоров в отдельных контурах сети. На основе этого метода, и в частности вытекающего из него условия (9), можно рекомендовать чисто графический способ расчета водопроводных сетей по аналогии с методом расчета статически определимых ферм путем построения диаграмм Максвелла—Кремоны.

В заключение определяются конкретные значения пьезометров P_i и напоров $H_i = P_i - z_i$ в узлах, расходов воды Q_{ji} , скоростей ее движения v_{ji} и потерь напора Δh_{ji} в отдельных водопроводных линиях сети.

При этом удобно воспользоваться разработанными номограммами для выбора экономически наиболее выгодных диаметров труб водопроводных линий, их гидравлического расчета и определения водопроводимости.

На основании полученных окончательных данных рекомендуется найти следующие основные критерии рациональности запроектированной водопроводной сети

$$\begin{aligned}
 & 1) P_i \geq z_i + H_{i\text{св}}; \\
 & 2) 0,5 \leq \frac{v_{ji}}{v_0 + a \sqrt{\frac{d_{ji}}{3}}} \leq 1,0; \\
 & 3) \frac{\sum_{i=1}^m (Q_{yi} + Q_{ci}) H_{i\text{св}}}{\sum_{i=1}^m (Q_{yi} + Q_{ci}) H_i} \geq 0,7,
 \end{aligned}$$

где v_0 и a — параметры, определяющие величину предельной экономической скорости движения воды для отдельных типов водопроводных труб и принимаемые по данным [5]; H_i — полученные расчетные напоры в рассматриваемых узловых точках сети; $H_{i\text{св}}$ — необходимые свободные напоры в этих точках. Остальные величины соответствуют ранее принятым их обозначениям.

Если эти условия в некоторых местах сети не соблюдаются, прибегают к необходимой корректировке диаметров отдельных ее линий, и весь изложенный выше расчет сети повторяется.

ЛИТЕРАТУРА

1. А б р а м о в Н.Н. Водоснабжение. — М., 1974.
2. К о й д а Н.У. Вычислительная техника в инженерных и экономических расчетах водоснабжения и канализации железнодорожного транспорта. Л., вып. 1, 1972; вып. 2, 1973.
3. М о ш н и н Л.Ф., С о м о в М.А. Руководство по использованию расчетов систем подачи воды с применением ЭЦВМ для выбора оптимальных решений при вариантном проектировании. М., 1970.
4. Гидравлический расчет систем водоснабжения на ЭВМ серии ЕС методом узловых напоров/А.П.Сытин, Н.М.Ногай, Ю.С.Петунин, В.М.Шмарakov. — Водоснабже

ние и санитарная техника, 1977, № 6. Старинский В.П. Проектирование водоводов минимальной приведенной стоимости и заданной надежности подачи воды потребителям. — В сб.: Водное хозяйство и гидротехническое строительство. Минск, 1980, вып. 10.

УДК 626/627.001.57

С.П.Г а т и л л о, асп. (БПИ)

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ МАСШТАБОВ ФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТРУБЧАТЫХ ВОДОСБРОСОВ

При исследовании гидравлики трубчатых водосбросов необходимо знать, каким условиям должны отвечать параметры моделей, чтобы полученные результаты можно было перенести на натурные сооружения.

Вопросам моделирования гидротехнических сооружений посвящено много работ, наиболее обобщающие из них — А.П.Зегжды [1], И.И. Леви [2], А.Д.Альтшуля [3].

В работах [1, 2] рассматриваются условия автомодельности, приводятся рекомендации по определению минимального допустимого числа Рейнольдса $Re_{д'}$ при превышении которого для обеспечения подобия явлений можно пользоваться законом моделирования по Фрудру. Здесь показывается: чтобы определяющими были силы тяжести, а влияние сил вязкости было незначительным, минимальный линейный масштаб модели должен определяться выражением

$$\alpha_l = \left(\frac{Re_{гр}}{Re_H} \right)^{2/3}, \quad (1)$$

где $\alpha_l = \frac{R_M}{R_H}$ — минимальный масштаб модели; $Re_{гр} = Re_{д'}$ — граничное (допустимое) значение числа Рейнольдса; Re_H — число Рейнольдса для потока в натуре; R_H и R_M — гидравлические радиусы потоков натурального и модельного сооружений.

При этом в работах [1–3] указывается на то, что при равенстве коэффициентов сопротивления модельного и натурального потоков

$$\lambda_M = \lambda_H \quad (2)$$

будет обеспечено подобие природы и модели в том случае, когда модельный поток относится к гладкой, переходной или квадратичной, а натуральный — к переходной или квадратичной областям сопротивления.

Для учета области сопротивления, в которой проводится моделирование, предложено большое количество зависимостей для определения значения граничных чисел Рейнольдса, например для докватричной области

$$Re_{гр} = \frac{14R}{k\sqrt{\lambda}} \quad [2]; \quad (3)$$