

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВОДНОГО И РУСЛОВОГО РЕЖИМА СЛОЖНОРАЗВЕТВЛЕННЫХ РЕЧНЫХ ДЕЛЬТ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ГИДРАВЛИКИ И УРАВНЕНИЯ БАЛАНСА НАНОСОВ

А.А. ПИСКУН

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт

Изложен подход к расчету сложноразветвленных дельт в условиях деформируемого русла методами одномерной гидравлики, при котором узел разветвления рассматривается одновременно и как точка гидравлического соединения или деления потока (при расчете сопротивлений), и как некоторый, отвечающий реальности, объект, заключенный между створами на концах рукавов, подводящих воду к узлу и отводящих (при расчете деформаций). Разработано уравнение баланса наносов для узлов русловых разветвлений и способ учета русловых деформаций при переменном подпоре. Предложены способы расчета гидравлических сопротивлений в условиях деформируемого русла при неизвестном его наполнении. Методика апробирована на примерах дельт рек Оби и Колымы. Определены задачи дальнейшего развития методики.

Важнейшими природными факторами, определяющими водный и русловый режим дельт, являются сток воды и наносов и их распределение по дельтовым рукавам, а также уровень приемного водоема, от которого зависит положение кривой свободной поверхности, т.е. наполнение русла.

Вследствие того, что дельты рек являются сложными системами как по строению русловой сети, так и по режиму, изменения в одной из их частей неизменно находят отклик в остальных. В связи с этим методы и зависимости, разработанные для расчета элементов режима в неразветвленных руслах, как правило, не могут быть использованы для русловых разветвлений непосредственно, без учета взаимосвязей во всей системе водотоков и без учета особенностей режима, подверженного, кроме речных факторов, влиянию уровня приемного водоема.

Разработке методов расчета водного и руслового режима в русловых разветвлениях уделяется постоянное внимание [1–5, 8, 11–13, 16, 18, 25–27, 29, 30 и др.], однако не все аспекты этой проблемы можно считать решенными. Особенно актуальным остается вопрос учета такими методами прямых и обратных связей во взаимодействующей системе поток–русло. Эти связи в общих чертах характеризуются тем, что при заданных граничных условиях пространственные характеристики распределения расходов и уровней воды в системе дельтовых водотоков определяются гидравлическими сопротивлениями, а перераспределение расходов и уровней по рукавам с течением времени – изменением этих сопротивлений, зависящим от русловых деформаций, которые, в свою очередь, неразрывно связаны с распределением расходов и уровней воды и расходов наносов.

Как известно, несмотря на неустановившийся в целом характер движения воды на устьевых участках рек, приемы гидравлики могут с успехом применяться для них при решении ряда практических задач. Это становится возможным, если элементы водного режима осреднить за некоторые, обоснованные специальными исследованиями, периоды времени [9, 10] и, таким образом, получить более про-

стую картину квазиустановившегося движения, которое часто определяют как движение открытого потока при переменном подпоре.

Среди методов гидравлического расчета расходов и уровней воды в русловых разветвлениях различаются методы, предназначенные для двухузловых или последовательно ветвящихся разветвлений (Н.Н.Павловский, 1937; В.М.Маккавеев, 1950; А.В.Караушев, 1955; С.С.Байдин, 1959, 1962, 1978, 1980; Г.Н.Ган и В.Н.Михайлов, 1971 и др.) и для сложноразветвленных систем (П.А.Войнович, 1932; А.И.Мордучай-Болтовской, 1952; В.М.Маккавеев, 1953; К.В.Гришанин, 1967; В.В.Иванов, 1967; Ф.М.Чернышов 1977, 1980; А.Ю.Жук, 1983 и др.). Большинство методов в свое время были подробно рассмотрены в работах С.С.Байдина [2] и систематизированы В.В.Ивановым [8].

Развивая итерационный метод К.В.Гришанина [5], позволяющий вести расчет при неизвестном наполнении русла (в условиях переменного подпора), В.В.Иванов создал метод, обладающий наиболее общей расчетной схемой и применимый к разветвлениям любой сложности [8]. Используемое в нем уравнение установившегося неравномерного движения для одного рукава записывается в конечных разностях в виде:

$$Q_i = \sqrt{\frac{|Z_{k_2 i} - Z_k|}{F_i}}, \quad (1)$$

где Q – расход воды, м³/с; Z – отметка уровня, м; k – порядковый номер узла разветвления; k_2 – индекс узла, сопряженного с k -тым узлом через i -тый рукав. Предполагается, что модуль сопротивления рукава F_i (с²м⁻⁵) однозначно определен средней отметкой свободной поверхности в рукаве \bar{Z}_i , т.е. задан зависимостью $F_i(\bar{Z}_i)$. Уравнение (1) получено из полного уравнения установившегося неравномерного движения при следующих допущениях: ввиду малых уклонов свободной поверхности и плавно изменяющихся форм русел в устьях длины расчетных участков приравняются к длинам рукавов; расходы воды в рукавах между смежными узлами полагаются постоянными; разностью кинетической энергии потока в начальных и конечных сечениях рукавов пренебрегают (поскольку на протяжении длинного расчетного участка плавные сжатия потока неоднократно сменяются плавными расширениями) [5, 8].

Уравнение неразрывности (баланса расходов воды в узле) записывается в виде [8]:

$$\sum_i^I Q_{p_{ik}} + \sum_i^{II} \text{sign}(Z_{k_2 i} - Z_k) \sqrt{\frac{|Z_{k_2 i} - Z_k|}{F_i}} = 0, \quad (2)$$

где $\text{sign}(Z_{k_2 i} - Z_k)$ – символ, определяющий направление течения и позволяющий заранее его не задавать; Σ^I – суммирование выполняется по рукавам с заданным расходом воды, примыкающим к k -тому узлу и вводящим в систему разветвлений или выводящим из нее расход; Σ^{II} – суммирование осуществляется по внутренним рукавам с неизвестными расходами Q_i и примыкающим к k -тому узлу; $Z_{k_2 i}$ – отметка уровня в узлах $k_2 j$, смежных с узлом k через i -тый рукав; индекс p означает «вводящий» рукав с заданными направлением течения и расходом воды. Система (2) решается методом релаксаций.

Универсальность метода, реализованного на ЭВМ, подтверждена широкой проверкой на методическом материале и на конкретных сложных разветвлениях.

В то же время его возможности исчерпываются расчетом распределения расходов и уровней воды при неизменной морфометрии либо при ее изменении, косвенно учитываемом в модулях сопротивления русла [8, 11].

Один из путей перехода от жесткого русла к деформируемому при гидравлических расчетах методом итераций был изложен в работе [12]. Связующим звеном между жестким руслом и деформируемым руслом в ней служит формула для определения F «морфометрическим» способом

$$F_i = (l_i \lambda_i) / (\omega_i^2 R_i 2g), \quad (3)$$

где l_i – длина i -того участка (рукава) (м); λ_i – коэффициент гидравлического трения русла; ω_i – средняя площадь поперечного сечения на участке (м²); R_i – гидравлический радиус (м), принимаемый равным средней глубине h_i ; g – ускорение силы тяжести.

Имеющиеся к настоящему времени методы расчета водного и руслового режима дельт в условиях установившегося движения потока, в которых реализован учет связей в системе поток–русло, условно можно разделить на две группы. В одной из них рассчитывается распределение расходов и уровней воды и элементы руслового режима в рукавах и, на основе сопоставления расхода наносов с транспортирующей способностью и фактических морфометрических характеристик с «устойчивыми» (по М.А. Михалеву [13] либо В.Н. Михайлову [18]), устанавливается направленность русловых процессов в водотоках [3, 13, 25]. Величина обратимых деформаций в ряде методов этой группы оценивается по расчетным характеристикам гряд. Основное различие отмеченных методов данной группы между собой состоит в способах расчета гидравлических сопротивлений – с детализацией их по длине рукавов и в узлах разветвлений [3] либо без детализации [13, 25]. В методе [1], отнесенном нами к этой же группе, кроме направленности русловых процессов, рассчитывается новое распределение расходов воды при измененной (в результате регулирования стока) морфометрии рукавов, найденной по зависимости между «устойчивыми» характеристиками (по В.Н. Михайлову) и руслоформирующими расходами (по Н.И. Маккавееву) с использованием гистограмм суточных расходов воды в дельтовых рукавах как для бытовых, так и проектных условий. Рассмотренную группу методов можно объединить под условным названием методов «тенденций».

Методы другой группы дают возможность рассчитывать начальное распределение расходов и уровней и их перераспределение за интервал времени, кратный целому числу лет, при наличии данных фактических наблюдений за деформациями, если эти данные позволяют установить «историческую» тенденцию развития водотоков [4] либо получить региональные эмпирические зависимости для вычисления деформаций [27]. Расчет ведется при руслоформирующем расходе воды в реке.

Все рассмотренные методы основаны на поочередном решении «гидравлического» блока (при расчете распределения расходов и уровней воды) и «руслового» (при расчете элементов руслового режима). «Гидравлический» блок, в зависимости от того, известно наполнение русла или нет, реализуется с помощью метода общих модулей сопротивления либо решением составленной для конкретного разветвления замкнутой системы уравнений, либо итерационным путем. Для решения «руслового» блока требуются данные, получаемые в результате длительных, зачастую многолетних, натурных наблюдений. При отсутствии же таких данных ни один из рассмотренных методов не позволяет рассчитывать перераспределение расходов и уровней воды в системе русловых разветвлений за заданный интервал времени при неизвестном наполнении русла.

Это и обусловило необходимость разработки методики гидравлического расчета перераспределения расходов и уровней, а также гидравлико-морфометрических характеристик в сложноразветвленных дельтах рек, учитывающей взаимодействие потока и русла в условиях переменного подпора и пригодной для использо-

вания при отсутствии данных наблюдений за изменением поперечных сечений русла под влиянием деформаций.

При разработке методики придерживаемся подхода, который заключается в поочередной реализации двух взаимосвязанных блоков – «гидравлического» и «руслового». Такой подход апробирован в рассмотренных методах [1, 4, 13, 25, 27], а также широко используется в инженерной практике при расчетах и математическом моделировании изменения отметок кривой свободной поверхности в неразветвленных руслах под влиянием деформаций дна [20]. При этом первый из блоков служит для расчета распределения расходов и уровней воды как на начальном этапе, так и на последующих, с учетом элементов руслового процесса, определяемых во втором блоке в зависимости от полученных значений расходов и уровней воды в первом блоке. Для расчета распределения расходов и уровней воды в разветвлениях («гидравлический» блок) используем итерационный метод В.В.Иванова [8], учитывая универсальность этого метода. Соответственно, принимаем все допущения, положенные в его основу. В отношении модулей сопротивления (F_i) считается действительным «постулат инвариантности» Н.Н.Павловского [22].

Подчеркнем, что мы будем оперировать модулями сопротивления рукавов, не разделяя потери напора на местные и по длине, учитывая, во-первых, большую протяженность расчетных участков в дельтах большинства рек (и, следовательно, многократное превышение потерь по длине над местными), во-вторых, сложности с расчетом местных сопротивлений в узлах (например, когда в них сопрягается более трех рукавов), в-третьих, необходимость в дополнительной исходной информации [19 и др.] в случае, если бы мы приняли вариант разделения потерь, и, в-четвертых, то, что для расчета распределения расходов и уровней по рукавам достаточно знать суммарное сопротивление каждого из них. Тем более что и в тех методах, в которых сопротивления (местные и по длине) определяются по отдельности [3, 19], в конечном счете они суммируются.

Расчет модулей сопротивления деформируемого русла представляет собой двудединую задачу, поскольку в зависимости от соотношения сопротивлений рукавов распределяется сток воды – один из основных факторов русловых деформаций, а деформации изменяют сопротивление рукавов и приводят к перераспределению стока. Понятно поэтому, что для определения F_i в условиях деформируемого русла удобнее всего использовать «морфометрические» зависимости вида (3), поскольку они содержат элементы руслового режима, изменение которых под влиянием деформаций возможно измерить в натуральных условиях либо определить расчетным путем. Такие формулы также включают коэффициент гидравлического трения λ , для определения которого существует ряд эмпирических зависимостей [6, 7 и др.]. Каждая из них имеет свои пределы применимости, определенные их авторами. В данную методику та или иная зависимость для λ включена с целью расширения возможностей адаптации методики к конкретным русловым разветвлениям.

Известно, что при расчетах расходов и уровней в сложных разветвлениях наилучшее соответствие расчетных данных натурным дает использование сопротивлений, полученных «гидрометрическим» способом А.Н.Рахманова [28] через отношение падения отметки уровня к квадрату расхода воды на участке. Этот способ определения F_i учитывает все виды потерь энергии и дает наименьшую погрешность в сравнении с «морфометрическим», основанным на использовании морфометрических характеристик при расчете F_i [24]. Для некоторых дельт крупных сибирских рек модули сопротивления ранее были получены по формуле А.Н.Рахманова на основе комплексного использования взаимосвязанных данных аэродинамического моделирования и натуральных материалов. Учитывая преимущества этого способа, целесообразно применить его и для расчета перераспределения расходов и уровней под влиянием изменяющейся при деформациях морфометрии русла.

Вначале остановимся на основных особенностях расчета модулей сопротивления F_i в условиях переменного подпора через коэффициент гидравлического трения λ_r . Поскольку для обеспечения итерационного процесса в «гидравлическом» блоке (который предшествует «русловому») требуется наличие зависимостей

$F_i(\bar{Z}_i)$, такие зависимости должны быть заданы, в данном случае хотя бы и произвольными (в качестве вспомогательных), для получения исходных значений расходов воды и отметок уровня. В то же время при расчете F_i через λ_r мы получаем в «русловом» блоке на каждом приближении (M) по одному значению λ_r , которое соответствует расчетному наполнению русла, вычисленному в предшествующем «гидравлическом» блоке. Переход от одного значения модуля сопротивления к зависимости $F_i(\bar{Z}_i)$ обеспечивается посредством замены исходной вспомогательной кривой $F_i(\bar{Z}_i)$ новой зависимостью, в которой все значения F_i исправлены на величину $(F_{\lambda_i} - F_{Z_i})$, полученную для расчетного наполнения, где

- индекс Z_i при F означает, что модуль сопротивления определен в «гидравлическом» блоке с использованием зависимости $F_i(\bar{Z}_i)$,
- индекс λ_i при F означает, что модуль сопротивления русла рассчитан в «русловом» блоке по формуле (3) через коэффициент гидравлического трения, определяемый одним из существующих способов.

В данном случае задание вспомогательных кривых $F_i(\bar{Z}_i)$ и процедура их корректировки дает возможность расчета расходов, уровней и гидравлико-морфометрических характеристик в сложных разветвлениях при неизвестном наполнении русла на основе формул для λ , предназначенных для заданного наполнения.

Взаимодействие между блоками продолжается до выполнения условий заданной точности ϵ . В качестве критерия завершения процесса приближений между блоками может быть принято численное равенство (с заданной точностью) модулей сопротивления двух смежных приближений, вычисленных как через λ_i ,

т.е. $F_{\lambda_i}^{(M)}$ и $F_{\lambda_i}^{(M+1)}$, так и по кривым $F_i(\bar{Z}_i)$, т.е. $F_{Z_i}^{(M)}$ и $F_{Z_i}^{(M+1)}$. Однако, задавая

точность расчетов по F_r , невозможно заранее судить о том, какие невязки расходов воды в рукавах будут получены между смежными приближениями на завершающем этапе вычислений, в связи с чем для наших целей примем более предпочтительный критерий, основанный на сравнении расходов воды в рукавах между смежными приближениями, т.е. $\max |Q_i^{(M+1)} - Q_i^{(M)}| \leq \epsilon$. Выполнение данного условия свидетельствует о том, что на момент t_0 все элементы режима взаимоувязаны с гидравлическими сопротивлениями, рассчитанными по одной из выбранных нами зависимостей для расчета λ_r .

Взаимодействие между «гидравлическим» и «русловым» блоками как для момента времени t_0 (т.е. при исходных морфометрических характеристиках), так и для момента t_1 (т.е. при новых морфометрических характеристиках, вычисленных с учетом русловых деформаций) выполняются аналогично с той разницей, что каждому этапу взаимодействия между блоками предшествует вычисление деформаций площади поперечных сечений и корректировка исходных кривых $\omega_{i,k}(Z_k)$.

Рассмотрим особенности расчета изменений гидравлических сопротивлений деформируемого русла на основе использования исходных зависимостей $F_i(\bar{Z}_i)$, имея в виду, что они получены наиболее точным «гидрометрическим» способом и соответствуют сопротивлениям на некоторый момент времени, который мы условно принимаем за начальный (t_0) для расчетного интервала Δt . Общую схему

расчетов при этом сохраним в виде взаимодействующих «гидравлического» и «руслового» блоков. Воспользуемся выражением (3), часть которого $2g\omega_i^2 h_i / l_i$ для сокращения записи обозначим через P_i . Тогда для начального момента времени t_0 формулу (3) можно представить в виде

$$\lambda_{Zi}^{(t_0)} = F_{Zi}^{(t_0)} P_i^{(t_0)}, \quad (4)$$

где индекс Zi при λ означает, что коэффициент гидравлического трения получен через F_{Zi} , где, в свою очередь, аналогичный индекс при F подчеркивает, что модуль сопротивления рассчитан в «гидравлическом» блоке по зависимости $F_i(\bar{Z}_i)$.

Далее, получив некоторым образом величины деформаций русла за расчетный интервал времени Δt (что будет рассмотрено ниже) и используя рассчитанные на момент t_0 в «гидравлическом» блоке значения расходов и уровней воды, мы можем определить начальные ($M = 0$) значения гидравлико-морфометрических характеристик на момент времени t_1 , включая $\omega_i^{(M, t_1)}$ и $h_i^{(M, t_1)}$, по которым несложно найти начальные значения модулей сопротивления для t_1 по выражению

$$F_{\lambda i}^{(M, t_1)} = \lambda_{Zi}^{(t_0)} / P_{i(\Delta\omega)}^{(M, t_1)}, \quad (5)$$

где индекс $(\Delta\omega)$ при $P_i^{(M, t_1)}$ означает, что характеристика определена после вычисления деформаций площади поперечного сечения.

Аналогичным способом будем уточнять значения модулей сопротивления $F_{\lambda i}^{(M+1, t_1)}$ очередного приближения между блоками на текущем шаге времени, подставляя в формулу (5) значения $P_{i(\Delta\omega)}^{(M+1, t_1)}$ и $\lambda_{Zi(\omega)}^{(M+1, t_1)}$, т.е.

$$F_{\lambda i}^{(M+1, t_1)} = \lambda_{Zi(\omega)}^{(M+1, t_1)} / P_{i(\Delta\omega)}^{(M+1, t_1)}, \quad (6)$$

где индекс (ω) означает, что характеристика определена до вычисления деформаций площади поперечного сечения.

При этом коэффициент гидравлического трения λ_{Zi} на очередном приближении уточняется по выражению

$$\lambda_{Zi(\omega)}^{(M+1, t_1)} = F_{Zi}^{(M, t_1)} P_{i(\omega)}^{(M+1, t_1)}. \quad (7)$$

Каждый переход от «руслового» блока к «гидравлическому» осуществляется после корректировки зависимостей $F_i(\bar{Z}_i)$, с учетом вычисляемых деформаций, на величину $(F_{\lambda i} - F_{Zi})$. Построенные таким образом приближения между блоками продолжают до выполнения заданной точности ϵ , о чем будет также свидетельствовать численное равенство $F_{\lambda i}$ и F_{Zi} на последнем приближении.

Аналогично рассмотренному строится порядок нахождения модулей сопротивления русла на последующих шагах времени.

В данном случае процедура корректировки зависимостей $F_i(\bar{Z}_i)$ дает возможность учесть во всей кривой $F_i(\bar{Z}_i)$ (т.е. для разных наполнений) изменения сопротивлений под влиянием деформаций, которые получены для одного наполнения.

Характеристики руслового режима, необходимые для расчета гидравлических сопротивлений через заданный интервал времени Δt , находят на основе уравнения деформаций. Такое уравнение, применяемое к одномерной модели руслового потока, получают путем составления баланса наносов для объема, ограниченного двумя произвольными поперечными сечениями потока [6]. В связи с этим принятое в рассмотренных гидравлических методах использование осредненных

по длине рукавов морфометрических характеристик предопределяет сложности применения уравнения деформаций в традиционной форме. Поэтому в данной методике при расчете деформаций водотоков будем задавать вместо осредненной – фактическую морфометрию на концах расчетных участков, осредняя ее лишь при расчете сопротивлений.

Как известно, решать уравнение деформаций можно двумя путями. Первый из них состоит в том, что выражение для расхода наносов вводится в дифференциальное уравнение деформации, что, как правило, усложняет решение задачи. Для наших целей остановимся на втором, более простом способе, который не требует прямой подстановки выражения для расхода наносов в уравнение деформаций, что позволяет применять любую формулу расхода наносов. Для определения деформации в нижнем сечении i -того рукава, сопряженного с k -ым узлом, за промежуток времени $\Delta t = t_{\tau+1} - t_{\tau}$ разностное уравнение деформации записывается в виде

$$\omega_{i,k_H}^{(t_{\tau+1})} = \omega_{i,k_H}^{(t_{\tau})} + \frac{W_{i,k_H}^{(t_{\tau})} - W_{i,k_B}^{(t_{\tau})}}{(1 - \sigma) l'_i} \Delta t, \quad (8)$$

где $\omega_{i,k_H}^{(t_{\tau+1})}$ и $\omega_{i,k}^{(t_{\tau})}$ – площади поперечного сечения на нижнем конце i -того рукава в моменты времени t_1 и t_0 , соответственно; $W_{i,k_H}^{(t_{\tau})}$ и $W_{i,k_B}^{(t_{\tau})}$ – расходы наносов ($\text{м}^3/\text{с}$) соответственно на нижнем и верхнем концах i -того рукава в момент t_{τ} ; σ – коэффициент пористости отложений в русле; l'_i – расстояние (м) между створами (рис. 1).

Решив уравнение (8), получаем значения площадей сечения на момент t_1 для нижних концов водотоков. Для верхних концов рукавов, отводящих воду из узла,

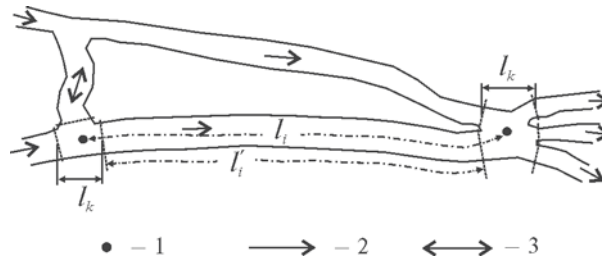


Рис. 1. Схема к определению расстояний в системе русловых разветвлений: 1 – точка гидравлического деления (соединения) потока; 2 – однонаправленный расход воды в рукаве; 3 – направление расхода меняется в зависимости от наполнения русла

расчет русловых деформаций балансовым методом усложняется в силу сложности происходящих в узлах процессов и их недостаточной общей изученности. В то же время при некоторых допущениях уравнение вида (8) может быть использовано для расчета деформаций на верхних концах рукавов, отводящих воду из узла. Принимая во внимание то, что в реальности створы на концах рукавов, примыкающих к узлу разветвления, в любом случае расположены на некотором расстоянии от точки гидравлического деления (соединения) потока, суммарный баланс наносов в k -том узле между примыкающими к нему выше и ниже расположенными створами i -тых рукавов можно записать по аналогии с уравнением (8) в виде

$$\sum_i \omega_{i,k_B}^{(t_{\tau+1})} = \sum_i \omega_{i,k_B}^{(t_{\tau})} + \frac{\sum_i W_{i,k_B}^{(t_{\tau})} - \sum_i W_{i,k_H}^{(t_{\tau})}}{(1 - \sigma) l_k} \Delta t, \quad (9)$$

где $\sum_i \omega_{i,k_B}^{(t_\tau)}$ и $\sum_i \omega_{i,k_B}^{(t_{\tau+1})}$ – суммы площадей живого сечения соответственно в моменты времени t_τ и $t_{\tau+1}$ на верхних концах i -тых рукавов, сопряженных с расчетным k -тым узлом (т.е. отводящих воду из разветвления); $\sum_i W_{i,k_B}^{(t_\tau)}$ и $\sum_i W_{i,k_B}^{(t_{\tau+1})}$ – суммы расходов наносов на момент t_τ соответственно для верхних (отводящих воду из узла) и нижних (подводящих воду к узлу) концов i -тых рукавов; l_k – расстояние (м) между створами, лежащими выше и ниже k -того узла разветвления, которое можно либо непосредственно назначать для каждого узла, либо определять через задаваемые исходные параметры.

При этом, учитывая большую протяженность расчетных участков ($l_i > B_i$) и сравнительно малые уклоны свободной поверхности в устьевых областях рек, при определении площадей поперечного сечения и ширин русла (B) по урезу на концах рукавов по заданным зависимостям $\omega_{i,k}(Z_k)$ и $B_{i,k}(Z_k)$ соответственно примем допущение о равенстве отметок свободной поверхности во всех сечениях, примыкающих к расчетному узлу.

Опираясь на уравнение (9), мы можем получить лишь суммарную величину деформаций на верхних концах рукавов, примыкающих к k -тому узлу, за промежуток времени Δt как разность между двумя первыми членами этого уравнения

$$\sum_i \Delta \omega_{i,k_B}^{(\Delta t)} = \sum_i \omega_{i,k_B}^{(t_{\tau+1})} - \sum_i \omega_{i,k_B}^{(t_\tau)} . \quad (10)$$

Величину же деформаций в каждом из створов на верхних концах рукавов $\Delta \omega_{i,k_B}^{(\Delta t)}$ выделим из этой суммы, полагая, что она пропорциональна безразмерному коэффициенту $\phi_{i,k_B}^{(\Delta t)}$, т.е.

$$\Delta \omega_{i,k_B}^{(\Delta t)} = \phi_{i,k_B}^{(\Delta t)} \sum_i \Delta \omega_{i,k_B}^{(\Delta t)} . \quad (11)$$

Коэффициент $\phi_{i,k_B}^{(\Delta t)}$ в формуле (11) выражает долю одного из гидравлико-морфометрических элементов (или их совокупности) в данном сечении по отношению к остальным сечениям на верхних концах рукавов, примыкающих к расчетному узлу. Поскольку на нынешнем этапе изученности процессов в узлах разветвлений окончательный выбор элемента для определения $\phi_{i,k_B}^{(\Delta t)}$ сделать затруднительно, для отработки методики в первом приближении мы можем использовать один из рассчитываемых элементов: расход наносов (W) или воды (Q), среднюю скорость (V), мутность воды (μ), коэффициент подвижности дна русла (V/V_0), уклон свободной поверхности (I) и т.п. При этом необходимо иметь в виду, что при $\sum_i \Delta \omega_{i,k_B}^{(\Delta t)} < 0$ (намыв) зависимость абсолютной величины деформаций от V , V/V_0 , I – обратная, а от μ – прямая (протоки с большей мутностью – наносотсасывающие – заиляются сильнее). И наоборот, при $\sum_i \Delta \omega_{i,k_B}^{(\Delta t)} > 0$ (размыв) характер зависимости величины деформаций с V , V/V_0 , I – прямой, с μ – обратный. Преимущество использования какого-либо из названных нами элементов (или их совокупности) для определения ϕ может быть обосновано в дальнейшем по мере накопления натурных и лабораторных материалов либо в результате проведения целенаправленных исследований узлов русловых разветвлений.

С учетом (11), уравнение деформаций для отдельного створа на верхнем конце i -того рукава, отводящего воду из рассматриваемого узла, запишется как

$$\omega_{i,k_B}^{(t_{i+1})} = \omega_{i,k_B}^{(t_i)} + \varphi_{i,k_B}^{(\Delta t)} \frac{\sum_i W_{i,k_B}^{(t_i)} - \sum_i W_{i,k_H}^{(t_i)}}{(1 - \sigma)I_k} \Delta t . \quad (12)$$

В дальнейших расчетах, имеющих методический характер, для определения φ использовалось соотношение

$$\varphi_{i,k_B}^{(\Delta t)} = W_{i,k_B}^{(t_i)} / \sum_i W_{i,k}^{(t_i)} . \quad (13)$$

Полагая, что рассчитанная величина $\Delta\omega$ всецело относится к деформациям ложа, изменение площади поперечного сечения при расчетах будем учитывать путем корректировки всех точек зависимостей $\omega_{i,k_H}(Z_k)$ и $\omega_{i,k_B}(Z_k)$ на расчетную величину деформаций $\Delta\omega$, поскольку эти изменения, полученные при данном наполнении, будут действительны и для других наполнений. При этом береговые деформации на расчетном шаге могут не приниматься во внимание, поскольку для дельт крупных рек ширина $B \gg h$ и, следовательно, изменения B по урезу при деформациях будут малозначимы на фоне деформаций ложа (тем более в условиях арктической зоны при наличии сдерживающих береговые деформации факторов). При переходе к другим граничным условиям береговые деформации могут учитываться посредством варьирования задаваемыми параметрами $B_{ik}(Z_k)$, которые включали бы фактические или предполагаемые изменения ширины по урезу.

Расходы русловых наносов в уравнении деформаций вычисляются по фактическим данным наблюдений за мутностью воды, а для створов, по которым такие данные отсутствуют, на основе одной из существующих для этой цели зависимостей.

Приемы корректировки кривых $F_i(\bar{Z}_i)$ и $\omega_{i,k}(Z_k)$ с учетом деформаций позволяют пересчитать уже по новым сопротивлениям все характеристики режима в процессе приближений между блоками на текущем шаге Δt и, что особенно важно, последовательно накапливать от шага к шагу эффект деформаций как в параметрах сопротивлений, так и морфометрии, и следовательно, переходить к новым граничным условиям. Тем самым достигается возможность автоматизации расчета при неизвестном наполнении. Расчеты выполняются для открытого русла при схематизации реального хода граничных условий в виде последовательных стационарных «ступенек», что практикуется и при математическом моделировании деформаций дна в неразветвленных руслах [20 и др.]. При этом продолжительность «ступенек» должна быть не менее допустимого периода осреднения граничных условий при приведении движения к квазиустановившемуся. Этот период для большинства дельт сибирских рек составляет 2–5 суток [10].

Для выполнения расчетов необходимы следующие исходные данные: граничные условия для каждого расчетного шага (расходы воды, поступающие в многоорукавное разветвление (Q_{pl}), и отметки уровня на выходе из разветвления), средняя для дельты температура воды, число шагов Δt и продолжительность каждого шага, точность расчетов ϵ , длины участков, расстояния между сечениями на концах рукавов в каждом из узлов, нулевые приближения отметок уровня в узлах, зависимости $F_i(\bar{Z}_i)$ (реальные – в случае счета по исходным кривым либо вспомогательные – в случае расчета F_i через λ_i), зависимости $\omega_{i,k}(Z_k)$ и $B_{ik}(Z_k)$, зависимости среднего диаметра влекомых и взвешенных наносов от расхода воды, зависимости мутности от расхода для створов, по которым имеются такие данные, плотность наносов, доля стока влекомых наносов от стока взвешенных на расчетных участках.

Общая последовательность расчетов построена следующим образом (рис. 2). При данных граничных условиях по заданным параметрам определяем в «гидрав-

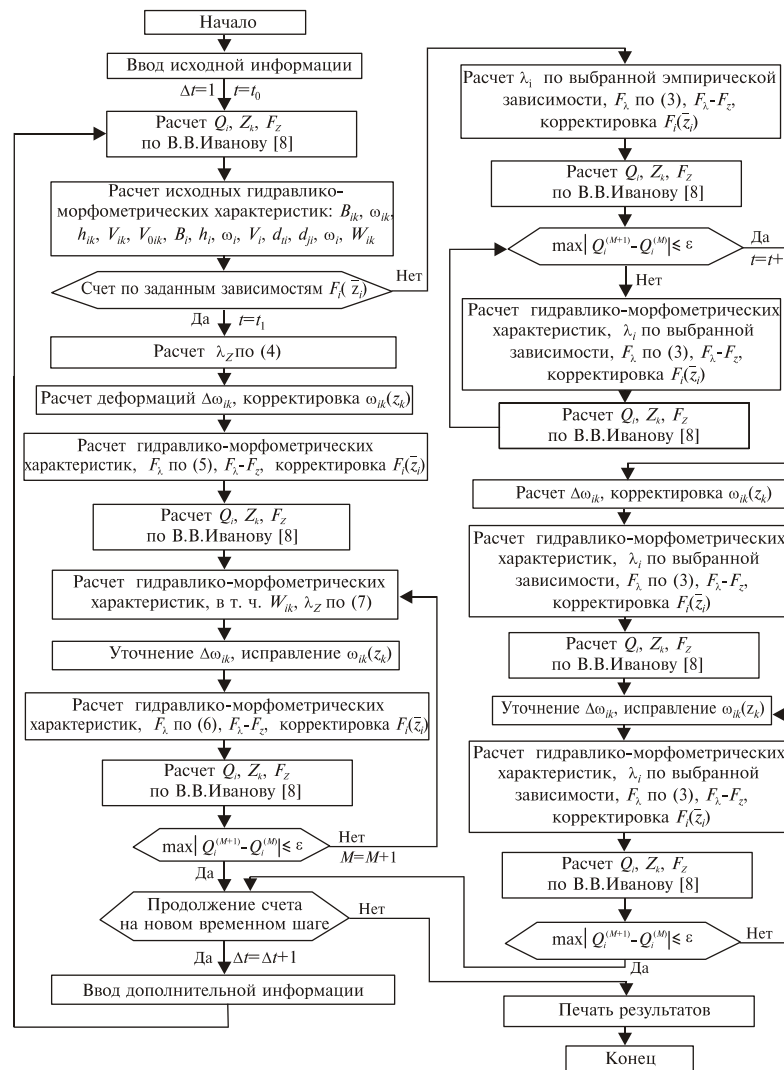


Рис. 2. Обобщенная блок-схема гидравлического расчета расходов, уровней воды и русловых деформаций в дельтовых водотоках

лическом» блоке методом итераций Q_i, Z_i, F_z и направление течения, по которым в «русловом» блоке находим гидравлико-морфометрические характеристики и расходы наносов W_{ik} на момент t_0 . Определяем деформации $\Delta\omega^{(\Delta t)}$, корректируем исходные для текущего шага Δt зависимости $\omega_{i,k}(Z_k)$. На их основе (но еще при $Q_i^{(t_0)}$ и $Z_k^{(t_0)}$) получаем гидравлико-морфометрические характеристики и F_λ . Корректируем зависимости $F_i(\bar{Z}_i)$ на величину $F_{\lambda i} - F_{z i}$. В «гидравлическом» блоке по новым кривым $F_i(\bar{Z}_i)$ находим очередные Q_i, Z_i, F_z и направление течения в рукавах, а в «русловом» – соответствующие им элементы режима, в т.ч. W_{ik} . По

ним уточняем $\Delta\omega$. Корректируем исходные для текущего шага зависимости $\omega_{i,k}(Z_k)$, по которым уточняем элементы режима и находим F_λ , затем корректируем зависимости $F_i(\bar{Z}_i)$, полученные на предыдущем приближении, на величину $F_{\lambda i} - F_{Zi}$ и в «гидравлическом» блоке пересчитываем Q_p, Z_k, F_Z . Проверяем условие заданной точности расчетов ϵ , сравнивая расходы воды смежных приближений между блоками. При его выполнении заканчивается расчет на текущем шаге времени Δt . Если необходимо, происходит переход к другим граничным условиям на последующем шаге. Это становится возможным благодаря наличию кривых $\omega_{i,k}(Z_k)$ и $F_i(\bar{Z}_i)$, откорректированных с учетом рассчитанных деформаций. В результате вычислений мы получаем набор последовательных состояний взаимосвязанных элементов режима в дельте для условий квазиустановившегося движения потока с учетом пошагового накопления эффекта рассчитываемых деформаций поперечных сечений русла. К этим элементам относятся: для узлов и створов – $Z_k, \omega_{i,k}, B_{ik}, h_{ik}, V_{ik}, V_{0ik}, (V/V_0)_{ik}, W_{ik}, \Delta\omega_{i,k}$ и откорректированные зависимости $\omega_{i,k}(Z_k)$; для рукавов – Q_p, \bar{Z}_i, I_p , средние на участке ω_p, B_p, h_p , значения F_i и откорректированные кривые $F_i(\bar{Z}_i), \lambda_p$, коэффициенты шероховатости и Шези. Если требуется, могут быть получены и другие гидравлико-морфометрические характеристики режима, а также расчетные параметры гряд.

Выполненная по фактическим материалам дельты р. Оби оценка погрешностей определения ω_{ik} , обусловленных допущением о равенстве отметок уровня во всех сечениях, примыкающих к узлу разветвления, подтвердила правомерность сделанного допущения. Эта погрешность оказалась на один-два порядка меньше той, которая обусловлена точностью натуральных измерений ω_{ik} .

Проверочные расчеты с использованием числового материала по дельте р. Оби показали соответствие получаемых результатов заданному алгоритму (рис. 3, 4).

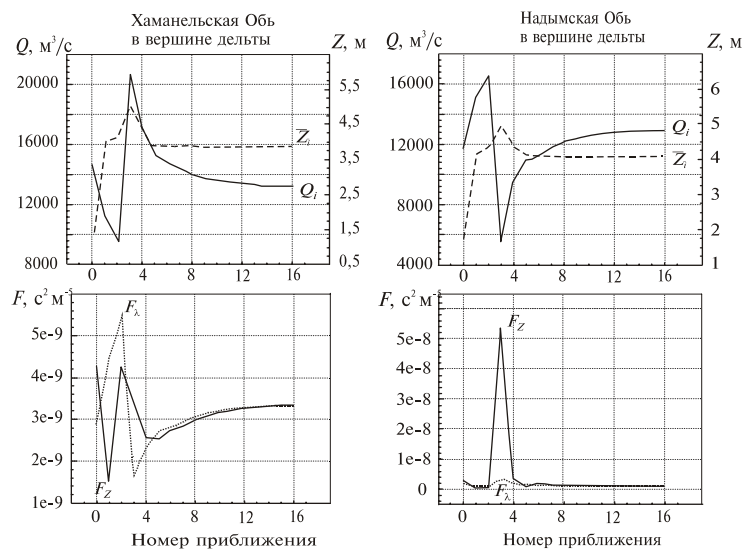


Рис. 3. Изменение расчетных характеристик рукавов в вершине дельты р. Оби в процессе приближений между «гидравлическим» и «русловым» блоками при вычислении гидравлических сопротивлений по методу Дж.Кеннеди

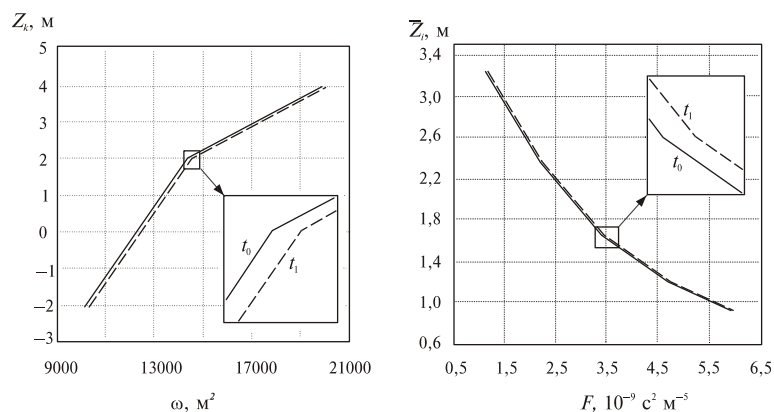


Рис. 4. Зависимости $w_{ik}(Z_k)$ и $F_i(\bar{Z}_i)$ на моменты времени t_0 и t_1 для Хаманельской Оби в вершине дельты, полученные за интервал $\Delta t = 7$ суток при использовании исходных зависимостей $F_i(\bar{Z}_i)$ для вычисления гидравлических сопротивлений

Численная проверка работы методики выполнена с применением заданных зависимостей $F_i(\bar{Z}_i)$, полученных «гидрометрическим» способом, формул для расчета гидравлических сопротивлений К.В.Гришанина, Г.Л.Гладкова, Дж.Кеннеди, В.С.Кнороза [6, 13 и др.], а также табличных значений коэффициентов Шези и шероховатости. Расход наносов при методических расчетах определялся по формулам К.В.Гришанина, В.Н.Гончарова, В.Графа и А.Акароглу, И.Ф.Карасева, Р.А.Бэгнольда, Ф.Энгелунда и Е.Хансена, С.Х.Абальянца, А.В.Караушева, И.И.Левина, Г.И.Шамова [6, 13, 14, 15 и др.]. При использовании их для конкретных объектов необходимо иметь в виду, что каждая из таких зависимостей имеет свои условия применимости. В случае, если формула позволяет рассчитывать расход только взвешенных наносов, для получения полного расхода вводится коэффициент, учитывающий долю стока влекомых от стока взвешенных наносов (при $V/V_0 \geq 1$). Расчет неразмывающей скорости в сечениях предусмотрен по формулам В.Н.Гончарова, В.С.Кнороза, Б.И.Студеничникова, Ц.Е.Мирцхулава, А.Шильдса, Г.И.Шамова, М.А.Великанова, А.М.Латышенкова [6, 14, 15, 17 и др.]. При необходимости в методику могут быть включены любые другие зависимости. Результаты проверочных расчетов показали, что выбор формулы для расхода наносов имеет решающее значение при определении деформаций в «русловом» блоке (табл. 1), как и выбор способа расчета сопротивлений для определения расходов и уровней – в «гидравлическом» [23, 26].

Для опытного применения методики, кроме дельты р. Оби, выполнена также параметризация дельты р. Колымы, относящейся к иному гидролого-морфологическому типу. Для нескольких наполнений русла проведена проверка, какой из способов определения гидравлических сопротивлений наиболее подходит для данных объектов. Сравнение результатов этих расчетов (по расходам и уровням) с материалами натурных измерений, физического и численного моделирования для устьевых участков рек Оби и Колымы показало, что наилучшее соответствие расчетных данных натурным или модельным дает использование «гидрометрического» способа расчета модулей сопротивления русла. Учитывая результаты предварительных расчетов все дальнейшие вычисления выполнялись с использованием исходных зависимостей $F_i(\bar{Z}_i)$, полученных «гидрометрическим» способом на основе обобщения сетевых, модельных и экспедиционных материалов.

Таблица 1

Расходы наносов (W_{ik} , м³/с) и русловые деформации ($\Delta\omega_{ik}$, м²) в дельте р. Оби, полученные по результатам тестовых расчетов при использовании различных формул для W (при средненавигационных условиях: расход воды в реке 26200 м³/с, отметка уровня на морском крае дельты 0,030 м БС)

Рукав (участок)	Автор формулы для W									
	С.Х.Абальин	Р.А.Безьялова	В.Гроф и А.Акароглу	К.В.Гришанин	В.Н.Гончаров	И.Ф.Карасев	А.В.Караушев	И.И.Левин	Г.И.Панов	Ф.Энгельши и Е.Хансен
W_{ik} на верхних концах участков										
1	1,98·10 ⁻¹	2,53·10 ⁰	2,89·10 ⁻²	4,74·10 ⁻¹	1,70·10 ⁻³	9,29·10 ⁻³	5,22·10 ⁻¹	1,44·10 ⁻²	5,31·10 ⁻⁴	1,75·10 ⁻¹
2	1,05·10 ⁻¹	5,22·10 ⁰	3,06·10 ⁻¹	3,42·10 ⁻¹	1,01·10 ⁻³	1,52·10 ⁻³	9,52·10 ⁻²	5,08·10 ⁻³	3,19·10 ⁻⁴	1,89·10 ⁻¹
3	5,77·10 ⁻²	6,49·10 ⁻¹	6,77·10 ⁻³	3,93·10 ⁻²	2,47·10 ⁻⁴	9,78·10 ⁻⁴	3,89·10 ⁻¹	1,13·10 ⁻²	9,24·10 ⁻⁵	2,99·10 ⁻²
4	1,65·10 ⁻²	3,01·10 ⁻²	5,28·10 ⁻⁴	1,07·10 ⁻²	7,59·10 ⁻⁵	3,05·10 ⁻⁴	6,39·10 ⁻²	3,53·10 ⁻³	2,79·10 ⁻⁵	8,42·10 ⁻³
5	1,69·10 ⁻²	1,28·10 ⁻¹	4,38·10 ⁻⁴	1,33·10 ⁻²	1,55·10 ⁻⁴	3,10·10 ⁻⁴	1,01·10 ⁻¹	2,22·10 ⁻³	5,30·10 ⁻⁵	1,79·10 ⁻²
6	1,37·10 ⁻¹	3,90·10 ⁻¹	2,31·10 ⁻³	1,17·10 ⁻¹	8,43·10 ⁻⁴	7,69·10 ⁻³	7,63·10 ⁻¹	2,08·10 ⁻²	2,79·10 ⁻⁴	6,60·10 ⁻²
W_{ik} на нижних концах участков										
1	2,00·10 ⁻¹	2,57·10 ⁰	2,43·10 ⁻²	4,28·10 ⁻¹	1,82·10 ⁻³	9,58·10 ⁻³	6,04·10 ⁻¹	1,49·10 ⁻²	5,65·10 ⁻⁴	1,87·10 ⁻¹
2	2,17·10 ⁻¹	5,67·10 ⁰	7,32·10 ⁻²	2,86·10 ⁻¹	3,97·10 ⁻³	7,48·10 ⁻³	4,40·10 ⁻¹	1,76·10 ⁻²	1,09·10 ⁻³	3,68·10 ⁻¹
3	9,80·10 ⁻²	5,80·10 ⁻¹	3,02·10 ⁻³	4,46·10 ⁻²	7,54·10 ⁻⁴	4,61·10 ⁻³	7,92·10 ⁻²	3,34·10 ⁻²	2,54·10 ⁻⁴	4,62·10 ⁻²
4	2,20·10 ⁻³	1,39·10 ⁻²	8,10·10 ⁻⁴	2,52·10 ⁻²	9,53·10 ⁻⁶	7,03·10 ⁻⁸	3,52·10 ⁻³	2,56·10 ⁻⁴	4,15·10 ⁻⁶	4,73·10 ⁻³
5	2,03·10 ⁻¹	2,00·10 ⁻¹	1,22·10 ⁻⁴	5,37·10 ⁻²	2,99·10 ⁻³	5,78·10 ⁻²	3,53·10 ⁰	6,66·10 ⁻²	7,82·10 ⁻⁴	4,76·10 ⁻²
6	1,17·10 ⁻¹	2,72·10 ⁻¹	1,63·10 ⁻³	8,55·10 ⁻²	8,81·10 ⁻⁴	6,22·10 ⁻³	7,75·10 ⁻¹	1,90·10 ⁻²	3,07·10 ⁻⁴	7,21·10 ⁻²
$\Delta\omega_{ik}$ на верхних концах участков										
1	7,75·10 ¹	1,21·10 ³	5,65·10 ⁰	5,04·10 ¹	9,19·10 ⁻¹	5,28·10 ⁰	2,89·10 ²	6,54·10 ⁰	2,71·10 ⁻¹	6,87·10 ¹
2	4,08·10 ¹	3,85·10 ³	5,97·10 ¹	3,64·10 ¹	5,44·10 ⁻¹	8,57·10 ⁻¹	5,15·10 ¹	2,29·10 ⁰	1,63·10 ⁻¹	7,44·10 ¹
3	-2,17·10 ²	-7,05·10 ²	4,71·10 ⁰	-1,40·10 ²	-2,18·10 ⁰	-3,31·10 ¹	-1,24·10 ³	-4,69·10 ¹	-5,78·10 ⁻¹	-3,44·10 ¹
4	-5,97·10 ⁰	-9,83·10 ¹	-2,11·10 ⁰	-5,87·10 ⁻¹	-4,96·10 ⁻²	-1,85·10 ⁻²	3,27·10 ⁰	-2,35·10 ⁰	-1,66·10 ⁻²	-3,96·10 ⁰
5	-6,23·10 ⁰	-5,01·10 ²	-1,75·10 ⁰	-7,34·10 ⁻¹	-1,01·10 ⁻¹	-1,82·10 ⁻²	4,12·10 ⁰	-1,49·10 ⁰	-3,16·10 ⁻²	-8,43·10 ⁰
6	-4,94·10 ¹	-1,17·10 ³	-9,19·10 ⁰	-6,45·10 ¹	-5,51·10 ⁻¹	-4,71·10 ⁻¹	3,93·10 ¹	-1,38·10 ¹	-1,77·10 ⁻¹	-3,10·10 ¹
$\Delta\omega_{ik}$ на нижних концах участков										
1	-1,40·10 ⁻¹	-9,73·10 ⁰	-2,56·10 ⁻¹	-2,75·10 ⁰	6,92·10 ⁻³	1,34·10 ⁻²	1,19·10 ⁰	1,95·10 ⁻²	1,87·10 ⁻³	5,99·10 ⁻¹
2	2,91·10 ¹	-2,18·10 ²	-5,83·10 ¹	-1,42·10 ¹	7,46·10 ⁻¹	1,51·10 ⁰	8,81·10 ¹	3,17·10 ⁰	1,94·10 ⁻¹	4,53·10 ¹
3	1,93·10 ⁰	1,73·10 ⁰	-1,21·10 ⁻¹	2,92·10 ⁻¹	1,67·10 ⁻²	1,25·10 ⁻¹	1,08·10 ¹	7,70·10 ⁻¹	5,30·10 ⁻³	5,54·10 ⁻¹
4	-3,28·10 ⁻¹	-3,05·10 ⁻¹	7,04·10 ⁻³	-2,02·10 ⁻¹	-1,69·10 ⁻³	-7,50·10 ⁻³	-1,28·10 ⁰	-8,03·10 ⁻²	-6,04·10 ⁻⁴	-9,20·10 ⁻²
5	4,66·10 ⁰	3,29·10 ⁰	-8,61·10 ⁻³	1,09·10 ⁰	7,81·10 ⁻²	1,56·10 ⁰	9,90·10 ¹	1,72·10 ⁰	2,01·10 ⁻²	8,18·10 ⁻¹
6	-5,48·10 ⁻¹	-1,49·10 ⁰	-2,48·10 ⁻²	-1,12·10 ⁰	1,41·10 ⁻³	-5,51·10 ⁻²	-1,51·10 ⁰	-5,80·10 ⁻²	3,77·10 ⁻⁴	2,45·10 ⁻¹

Номерами обозначены следующие рукава (участки): 1 – Хаманельская Обь в вершине дельты, 2 – Надымская Обь в вершине дельты, 3 – Большая Наречинская, 4 – Малая Хаманельская, 5 – Муринская, 6 – Хаманельская у Горного Хаманеля

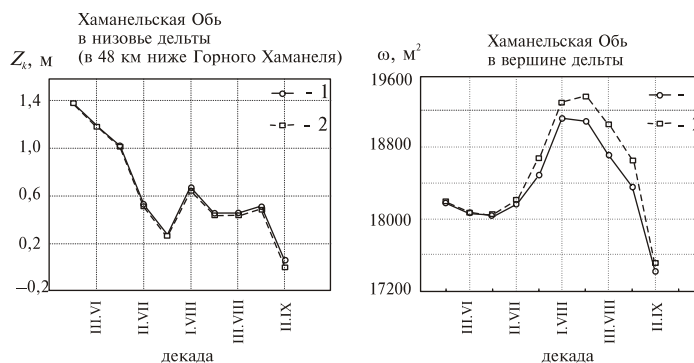


Рис. 5. Расчетный ход элементов режима без учета (1) и с учетом (2) деформаций русла (дельта р. Оби, 1979 г.)

Применение методики для оценок элементов водного и руслового режима в естественных условиях выполнено по дельте р. Оби для многоводного 1979 г. (при подекадном ходе граничных условий для периода открытого русла) (рис. 5). Расходы наносов W_{ik} рассчитывались по формуле К.В.Гришанина, дающей близкое соответствие натурным материалам.

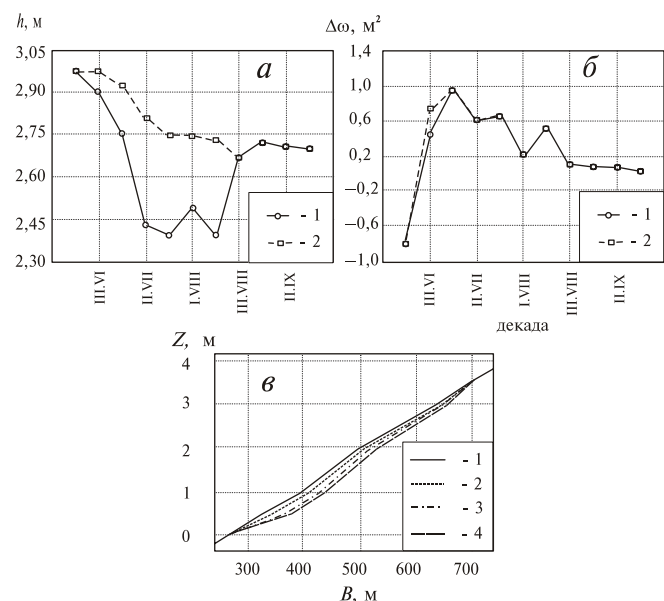


Рис. 6. Подекадный ход средней глубины (а) и деформаций ложа (б) в истоке протоки Поперечная I при отсутствии береговых деформаций (1) и при заданной их величине (2) для условий 1985 г. по результатам экспериментальных расчетов; (в) – задаваемые при этом зависимости ширины русла поверху от отметки уровня на расчетных шагах для I, II, III декад мая, I, II декад июня

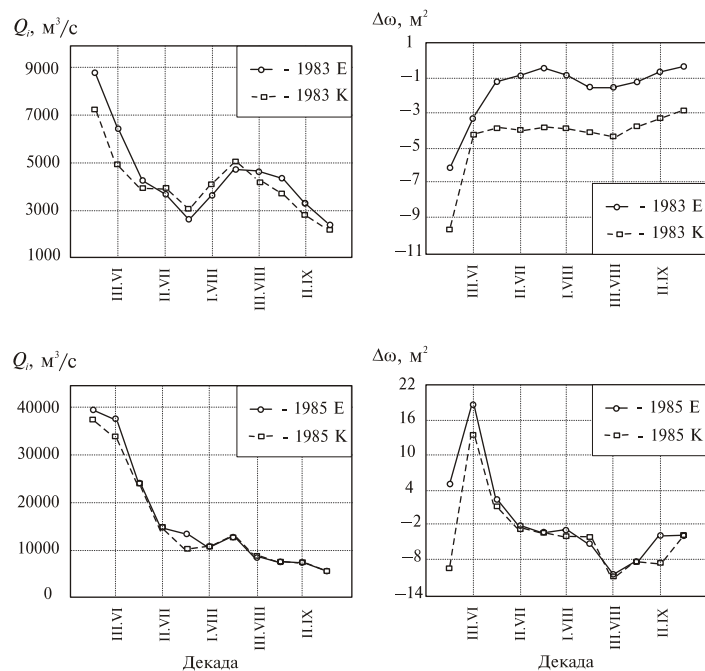


Рис. 7. Расчетный ход среднедекадных расходов воды Q_i и русловых деформаций $\Delta\omega_{i,k}$ в Каменной протоке в вершине дельты Колымы в период открытого русла в естественных условиях (E) и при работе каскада ГЭС (K) в 1983 (маловодный) и 1985 (многоводный) гг.

По дельте р. Колымы апробировались варианты без учета и с учетом экспериментально задаваемого изменения ширины русла по урезу от шага к шагу (рис. 6). При этом гипотетическое увеличение ширины русла (в рабочем диапазоне уровней) было принято равным 20 м для III декады мая, 15 и 10 м для I и II декад июня соответственно. Учитывая методический характер расчетов, использовались ориентировочные зависимости $\mu_{ik}(Q_i)$, полученные в результате сопряженного анализа результатов гидравлических расчетов (по Q_i и Z_k) и натуральных данных по W_{ik} и μ_{ik} в дельте и на замыкающем створе Колымское.

Использование методики для оценок элементов водного и руслового режима в антропогенно измененных условиях опробовано для вариантов регулирования стока р. Колымы каскадом ГЭС для лет малой (1983) и большой (1985) водности (в сравнении с естественными условиями) (рис. 7), а также искусственного изменения размеров поперечного сечения одного из водотоков дельты р. Колымы для граничных условий 1985 г. при расходах воды в реке 20 % обеспеченности.

Выполненные расчеты показали возможность использования методики для получения осредненных за определенные интервалы времени количественных характеристик элементов водного и руслового режима в естественных и проектных условиях:

- при фактических граничных условиях, осредненных за допустимый период;
- при реальных граничных условиях (с учетом минимально допустимого периода их осреднения), которые из-за редкой повторяемости одновременно не наблюдались, но могут совместно проявиться в более продолжительном ряду;
- при рассмотрении обобщенных либо схематизированных ситуаций хода граничных условий, что бывает необходимо для выделения вклада колебаний стока реки или уровня приемного бассейна в изменчивость того или иного элемента режима на акватории дельты;
- при экспериментальной проверке влияния на водный и русловой режим в дельте различных вариантов изменения во времени задаваемых исходных параметров и граничных условий; при этом на любом расчетном шаге могут учитываться изменения как отдельных исходных параметров, так и их совокупности в различных сочетаниях;
- при оценках последствий регулирования стока рек и искусственного изменения пропускной способности русла непосредственно в дельтах.

Таким образом, представленная методика отличается новым подходом к расчету русловых деформаций в сложных русловых разветвлениях методами одномерной гидравлики, суть которого в том, что при расчете сопротивлений узел разветвления рассматривается с общепринятых в одномерной гидравлике позиций – как точка гидравлического соединения или деления потока. Это позволило оперировать значениями модулей сопротивления рукавов, суммарно учитывающими все виды потерь энергии, что и требуется для расчета распределения расходов и уровней воды в сложных разветвлениях. При расчете же деформаций узел выступает как некоторый, отвечающий реальности объект, заключенный между створами на концах рукавов, подводящих воду к узлу и отводящих. Это дало возможность рассчитывать деформации на основе уравнения баланса наносов (для неразветвленных участков – в традиционном виде, а для узлов разветвлений – в предложенном), используя фактические значения площадей поперечных сечений, которые затем, после исправления их на величину деформаций, осредняются для соответствующих участков, обеспечивая переход к пересчету суммарных гидравлических сопротивлений рукавов с учетом деформаций. Изложенный подход может быть использован и в одномерных численных методах расчета деформаций дна при неустановившемся движении воды в русловых разветвлениях, т. к. позволяет отказаться от применявшейся в таких моделях гипотезы о равенстве отметок дна в сечениях рукавов, сопряженных в одном узле [21 и др.].

Разработанная на основе этого подхода методика, в отличие от существующих методов, позволяет рассчитывать перераспределение расходов и уровней воды в разветвлениях и изменение поперечных сечений под влиянием русловых деформаций при отсутствии данных наблюдений за последними. При разработке методики учитывалась, с одной стороны, слабая изученность дельт рек арктической зоны, а с другой – потребность в наиболее полном усвоении всего комплекса гидрометрических данных, получаемых на стационарной сети и в экспедициях.

Основными задачами дальнейших исследований в рамках рассмотренных вопросов являются: выявление по натурным и лабораторным данным закономерностей балансовых характеристик расходов наносов в узлах дельтовых разветвлений, их связей с другими элементами режима и геометрическими характеристиками узла, с целью надежного обоснования коэффициента пропорциональности в уравнении деформаций для узла разветвления; разработка методов расчета гидравлических сопротивлений в дельтах в зимний и переходные периоды; обоснование региональных формул для расчета расходов наносов применительно к конкретным дельтам и к их отдельным районам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алабян А.М., Сидорчук А.Ю.* Метод расчета переформирований русел, разветвленных на рукава рек, при изменении гидрологического режима // *Метеорология и гидрология*. 1987. № 10. С. 82–88.
2. *Байдин С.С.* Сток и уровни дельты Волги. М.: Гидрометеиздат, 1962. 337 с.
3. *Васильев Л.В., Марченко А.С.* О гидравлическом расчете сложных разветвлений естественных русел // *Гидрофиз. процессы в реках и водохранилищах: Докл. 2-й Всесоюз. конф.* Москва, 19–23 нояб., 1984 г. М., 1985. С. 42–46.
4. *Гранич П.С.* Метод расчета перераспределения стока воды по рукавам неприливной дельты с учетом русловых деформаций (на примере устья Дуная). М.: Изд-во МГУ, 1987. 12 с. Деп. в ВИНТИ. № 559–В87.
5. *Гришанин К.В.* Гидравлический расчет элементов водного режима в дельтах рек арктической зоны // *Тр. ААНИИ*. 1967. Т. 278. С. 5–21.
6. *Гришанин К.В.* Динамика русловых потоков. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 311 с.
7. *Гришанин К.В.* Гидравлическое сопротивление естественных русел. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 184 с.
8. *Иванов В.В.* Метод гидравлического расчета элементов водного режима в дельтах рек // *Тр. ААНИИ*. 1968. Т. 283. С. 30–63.
9. *Иванов В.В.* Метод расчета стоковой составляющей колебаний уровней в устьях рек // *Тр. ААНИИ*. 1968. Т. 283. С. 12–29.
10. *Иванов В.В.* О временной изменчивости стока и уровней в дельтах рек // *Тр. ААНИИ*. 1970. Т. 290. С. 6–17.
11. *Иванов В.В.* Гидравлический метод расчета перераспределения стока в дельтах рек под влиянием водохозяйственных мероприятий // *Тр. IV Всесоюз. гидрол. съезда*. 1975. Т. 5. С. 388–398.
12. *Иванов В.В., Марченко А.С., Михалев М.А.* Развитие методов расчета водного режима многорукавных русел рек с учетом русловых процессов и основные задачи экспериментальных исследований в этой области // *Тр. ААНИИ*. 1980. Т. 358. С. 46–54.
13. *Иванов В.В., Михалев М.А., Марченко А.С., Пискун А.А., Чернин К.Е.* Гидравлический метод расчета водного и руслового режима в многорукавных руслах рек // *Тр. ААНИИ*. 1984. Т. 378. С. 5–22.
14. *Карасев И.Ф.* Русловые процессы при переброске стока. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 288 с.
15. *Караушев А.В.* Теория и методы расчета речных наносов. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 272 с.

16. *Маккавеев В.М.* К гидравлике сложного разветвления естественного русла // Тр. ЛИВТ. Вып. XX. Л.; М.: Изд-во Мин. реч. и мор. флота, 1953. С. 162–169.
17. *Мирихулава Ц.Е.* Основы физики и механики эрозии русел. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 330 с.
18. *Михайлов В.Н., Рогов М.М., Чистяков А.А.* Речные дельты (гидролого-морфологические процессы). М.: Гидрометеиздат, 1986. 280 с.
19. *Михалев М.А., Марченко А.С., Кумина Т.Д., Чудинова Л.Б., Вансевичус А.Ю.* Моделирование гидравлических явлений в разветвленном русле // Тр. V Всесоюзн. гидрол. съезда. 1990. Т. 9. С. 94–101.
20. *Москаль А.В.* Математическое моделирование влияния дноуглубительных работ и разработки подводных карьеров на русла судоходных рек: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 1999. 20 с.
21. *Овчарова А.С.* Численный метод расчета деформации дна в системах открытых русел и каналов // Механика неоднородных сплошных сред. Новосибирск, 1981. Вып. 52. С. 78–87.
22. *Павловский Н.Н.* Гидравлический справочник. Л.; М., 1937. 890 с.
23. *Пискун А.А.* Анализ водного и руслового режима дельты Оби // Водные ресурсы. 2002. Т. 29. № 4. С. 395–404.
24. *Пискун А.А.* Оценка точности расчета модулей сопротивления речного русла // Проблемы Арктики и Антарктики. 1978. Вып. 53. С. 55–60.
25. *Пискун А.А.* Методика гидравлического расчета водного и руслового режима сложноразветвленных дельт рек (на примере дельты Колымы). СПб.: ААНИИ, 1992. 16 с. Деп. в ВНИИГМИ-МЦД 18.11.92. № 1127-ГМ92.
26. *Пискун А.А.* Методика расчета водного и руслового режима в сложноразветвленных дельтах рек при отсутствии данных наблюдений за русловыми деформациями: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2002. 25 с.
27. *Полонский В.Ф.* Одномерная математическая модель динамики дельтовых водотоков // Тр. V Всесоюзн. гидрол. съезда. 1990. Т. 9. С. 101–109.
28. *Рахманов А.К.* К вопросу о построении кривых свободной поверхности для естественных водотоков // Гидротехническое строительство. № 10. 1934. С. 1–4.
29. Руководство по расчету элементов гидрологического режима в прибрежной зоне морей и в устьях рек при инженерных изысканиях. М.: Гидрометеиздат, 1973. 535 с.
30. *Чернышов Ф.М.* Распределение расхода воды на разветвленных участках // Тр. НИИВТ. 1980. Вып. 139. С. 130–163.

A.A.PISKUN

**METHOD OF CALCULATION OF WATER AND CHANNEL NET REGIME OF
COMPLICATED BIFURCATED RIVER DELTAS BASED ON THE METHODS OF
HYDRAULICS AND EQUATION OF SEDIMENT TRANSPORT BUDGET**

An approach to calculation of complicated bifurcated deltas under the conditions of deformed channel by one-dimensional hydraulics methods is presented. In addition, the node of branching is considered both as a point of hydraulic connection or stream division (at resistance calculation), and as some object, responding to reality, confined between the section lines at the ends of the branches, bringing water to node and removing (at deformation calculation). Equation of sediment load balance for channel net branching nodes and the way of taking into account stream deformations at variable afflux are developed. Methods of calculation of hydraulic resistances under the conditions of deformed channel at its unknown filling are proposed. The method was tested by the examples of the Ob and Kolyma River deltas. Problems of further development of the method are determined.