

ХАРЬКОВСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

САВЕНКО Вячеслав Яковлевич

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА
КВАЗИТРЕХМЕРНЫХ БЕЗНАПОРНЫХ ПОТОКОВ

05.23.16 - Гидравлика и инженерная гидрология

А В Т О Р Е Ф Ф Р А Т

диссертации на соискание ученой степени доктора
технических наук

ХАРЬКОВ 1993

Диссертацией является рукопись

Работа выполнена в Киевском автомобильно-дорожном институте

Научные консультанты:

доктор технических наук, профессор Большаков В. А.

доктор технических наук, профессор Шеренков И. А.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Нетихайло А. П.

доктор технических наук, старший научный сотрудник Бруцкий В. В.

доктор физико-математических наук, профессор Шмаков Ю. И.

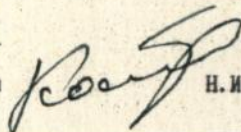
Ведущая организация - Украинский государственный институт по проектированию дорожного хозяйства Министерства транспорта Украины, г. Киев

Защита состоится 19 января 1994 г. в 11 час. на заседании специализированного ученого совета Д 02.07.01 в Харьковском инженерно-строительном институте, 310002, г. Харьков-2, ул. Сумская, 40

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Харьковского инженерно-строительного института, г. Харьков-2, ул. Сумская, 40

Автореферат разослан 10 января 1993 г.

Ученый секретарь специализированного ученого совета



Н. И. Колотило

ЛНБ України ім. В. Стефаника



00802310 (E)

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН УРСР

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Возведение в речных руслах различных гидротехнических сооружений приводит к искусственному стеснению потока, нарушающему его бытовые условия. К характерным особенностям искусственно сжатых русел следует отнести: наличие значительных водосоротных областей, вторичных течений поперечной циркуляции, неравномерность распределения скоростей и расходов по ширине и длине потока. Эти особенности и обуславливают возникновение в речных руслах сосредоточенных размывов, которые в большинстве случаев являются причиной повреждений и разрушений сооружений.

Существующие методы расчета сооружений, в своем большинстве базируются на одномерных моделях движения жидкости и не позволяют непосредственно рассчитывать поля скоростей отрывных течений, вторичных течений поперечной циркуляции и деформаций русел от сосредоточенных размывов.

Эти обстоятельства выдвигают научную проблему, решение которой позволит проводить расчеты сооружений с учетом характерных особенностей искусственно сжатых русел. Предложенные решения должны обеспечивать достаточную точность для инженерной практики и высокую оперативность, позволяющую проводить многовариантные проработки исследуемых объектов.

Базисной частью этой проблемы является решение гидравлических и гидромеханических задач взаимодействия потоков и сооружений. Поэтому, разработка методов прогноза деформаций русел на основе современных моделей движения жидкости является актуальной проблемой.

Цель работы заключается в разработке математических моделей и методов расчета квазитрехмерных безнапорных потоков.

Для достижения цели работы потребовалось решение следующих задач:

- разработка математической модели квазитрехмерных безнапорных потоков с учетом $k-\epsilon$ модели турбулентности;
- разработка методов расчета вторичных течений поперечной циркуляции, планов нестационарных и стационарных отрывных течений с учетом эффекта поперечной циркуляции и нормальных турбулентных напряжений и без учета теквых;
- разработка математической модели и метода расчета плановых деформаций русел;
- проведение экспериментальных исследований для апробации и калибровки разработанных математических моделей и методов их

реализации.

Научная новизна и личный вклад автора. На защиту выносятся:

- математическая модель нестационарной плановой задачи отрывных течений с учетом и без учета эффекта вторичных течений поперечной циркуляции и нормальных турбулентных напряжений с использованием для замыкания уравнений гидродинамики $k-\epsilon$ модели турбулентности;

- математическое описание механизма вторичных течений поперечной циркуляции;

- математическая модель расчета плановых деформаций русел;

- метод расчета планов неустановившихся и установившихся отрывных течений как с учетом, так и без учета вторичных течений поперечной циркуляции и нормальных турбулентных напряжений;

- метод решения двумерного уравнения баланса наносов.

Достоверность полученных результатов подтверждена данными теоретических и экспериментальных исследований, применением методов математической статистики и теории вероятностей, оценкой достоверности экспериментов, сопоставлением полученных решений с данными физического эксперимента, апробацией результатов работы на различных уровнях.

Результаты исследований, представленные в диссертации, получены автором лично и под его руководством, использованы для решения конкретных задач в составе многих проектов в области проектирования мостовых переходов.

Практическое значение работы определяется тем, что она позволяет повысить научно-инженерный уровень решения крупных народнохозяйственных проблем регулируемого взаимодействия потоков с объектами различного назначения; обеспечить гидравлические и русловые расчеты при оценках и прогнозах русловых деформаций, обусловленных инженерными решениями.

Результаты исследований использовались при проектировании мостовых переходов: через р. Десна у с. Пироговка, через р. Стрий у г. Жидачев (институт "Укргипродор"), через р. Днестр у г. Дубоссары и пгт Атаки (Молдавский государственный институт проектирования автомобильных дорог), а также при выполнении проектов ремонтных работ автодорожного моста на автомобильной дороге Сокаль - Гостраница и подводной части опор моста на автомобильной дороге Одесса - Рени (научно-производственная фирма "Мостбудсервис").

Апробация работы. Основные результаты исследований автора докладывались и обсуждались на:

1. Ежегодных научных конференциях профессорско-

преподавательского состава Киевского автомобильно-дорожного института (1975 - 1992г.г.).

2. IV Республиканской конференции по научно-техническим проблемам гидравлики дорожных водопропускных сооружений (Сератов, 1985).

3. Научно-технической конференции "Повышение качества строительства автомобильных дорог в Нечерноземной зоне РСФСР" (Владимир, 1987).

4. Научно-технической конференции "Интенсификация дорожного строительства" (Владимир, 1988г.).

5. Научно-технической конференции "Интенсификация дорожного строительства" (Владимир, 1988).

6. Научно-технической конференции "Повышение эффективности использования водных ресурсов в сельском хозяйстве" (Новочеркасск, 1989).

7. Заседаниях Украинского научного семинара по гидравлике открытых русел и сооружений при Киевском автомобильно-дорожном институте (ноябрь 1991 г., июнь 1992 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 26 научных работ. Отдельные результаты диссертационной работы использованы в 3 учебно-методических разработках.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Она изложена на 367 страницах машинописного текста, иллюстрирована 4 таблицами, 57 рисунками и содержит 4 приложения. Список литературы включает 239 наименований. Приложены справки о внедрении результатов исследований в практику проектирования мостовых переходов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении и показана актуальность работы, сформулированы цель и задачи настоящего исследования, обосновано логическое построение диссертационной работы и изложено краткое ее содержание по главам.

В первой главе разработана математическая модель квазитрехмерного течения жидкости с учетом $k-\epsilon$ модели турбулентности.

В качестве исходных уравнений используются дифференциальные уравнения осредненного движения О. Рейнольдса.

При интегрировании по глубине потока слагаемых, содержащих производные по горизонтальным координатам (x_1, x_2) и времени t ,

использовались свойства интегралов, зависящих от параметров.

В результате интегрирования трехмерных уравнений турбулентного движения и оценки порядка слагаемых получены уравнения движения и неразрывности плановой задачи в виде:

$$\frac{\partial U_1}{\partial t} + \alpha_n \left[\frac{\partial U_1^2}{\partial x_1} + \frac{\partial U_1 U_2}{\partial x_2} \right] = -g \frac{\partial H}{\partial x_1} - \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\overline{V_1^2} - \overline{V_2^2} \right) - \frac{\partial}{\partial x_2} \overline{V_1 V_2} + \frac{1}{\rho h} (\tau_{1H} - \tau_{1zo}); \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_2}{\partial t} + \alpha_n \left[\frac{\partial U_1 U_2}{\partial x_1} + \frac{\partial U_2^2}{\partial x_2} \right] = -g \frac{\partial H}{\partial x_2} - \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\overline{V_2^2} - \overline{V_1^2} \right) - \frac{\partial}{\partial x_1} \overline{V_1 V_2} + \frac{1}{\rho h} (\tau_{2H} - \tau_{2zo}); \quad (2)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \sum_{i=1}^2 \frac{\partial U_i h}{\partial x_i} = 0. \quad (3)$$

Полученная система уравнений плана течений (1) - (3) является незамкнутой, так как в уравнениях движения присутствуют нормальные и касательные турбулентные напряжения. Наличие в уравнениях этих напряжений приводит к необходимости аппроксимации с помощью определенной модели турбулентности членов турбулентного переноса.

Значительный вклад в решение проблемы замыкания системы уравнений турбулентного движения внесли А. Н. Колмогоров, Л. Прандтль, Л. Г. Лойцянский, Ю. Ротта, Б. И. Давыдов, А. С. Монин, М. Д. Миллионщиков, Г. С. Глушко, Л. Г. Невзглядов, А. Н. Секундов, Б. А. Коловандин, К. В. Джаугуштин, Н. Д. Булеев, В. В. Бруацкий, А. П. Нетухайло, К. Ханжалик, Б. В. Лаундер, Д. Б. Сполдинг, К. Доньяльдсон, П. Г. Самвен и другие. При расчетах отрывных течений с учетом поперечной циркуляции необходимо применять модели турбулентности, учитывающие пульсационную структуру турбулентного потока. Одной из таких моделей является к-ε модель, которая основана на концепции турбулентной вязкости:

$$-\overline{V_i V_j} = \nu_t \left[\frac{\partial \overline{V_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{V_j}}{\partial x_i} \right] - \frac{2}{3} K \delta_{ij}. \quad (4)$$

Эта модель широко апробирована применительно к задачам расчета пограничного слоя и турбулентных струй. В настоящей работе к-ε модель турбулентности обобщена и применяется к расчету квазитрехмерных отрывных течений, и с учетом общепринятых модельных соотношений уравнения имеют вид:

$$\frac{\partial K}{\partial t} + \bar{V}_j \frac{\partial K}{\partial x_j} = \nu \left[\frac{\partial^2 v_1}{\partial x_j^2} + \frac{\partial v_1}{\partial x_j} \right] \cdot \frac{\partial v_1}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{v_1}{\sigma_\varepsilon} \cdot \frac{\partial v_1}{\partial x_j} \right] - \varepsilon; \quad (5)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{V}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{v_1}{\sigma_\varepsilon} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial v_1} \right] \cdot \left[C_1 \frac{P}{\varepsilon} - C_2 \right] \cdot \frac{\varepsilon}{K}. \quad (6)$$

При наличии отрывных течений, искривлений плановых струй возникают вторичные течения поперечной циркуляции, роль которых в формировании скоростной структуры потока, русла, переносе наносов весьма существенна.

Выделив в локальных поперечных скоростях составляющие вторичных течений поперечной циркуляции

$$\bar{V}_2 = U_2 + u_2; \quad \bar{V}_3 = u_3$$

и проинтегрировав по глубине потока уравнения движения Рейнольдса для продольного и поперечного направлений координат, а также проведя оценку слагаемых величин, в работе получены уравнения плановой задачи в декартовых координатах с учетом эффекта вторичных течений поперечной циркуляции:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_1}{\partial t} + \alpha_n \left[\frac{\partial U_1^2}{\partial x_1} + \frac{\partial U_1 U_2}{\partial x_2} \right] + \frac{\partial}{\partial x_2} \langle \bar{V}_1 u_2 \rangle = -g \cdot \frac{\partial H}{\partial x_1} - \frac{\partial}{\partial x_1} \langle \bar{V}_1^2 \rangle - \\ - \langle \bar{V}_3^2 \rangle - \frac{\partial}{\partial x_2} \langle \bar{V}_1 \bar{V}_2 \rangle + \frac{1}{\rho n} (\tau_{1H} - \tau_{120}); \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_2}{\partial t} + \alpha_n \left[\frac{\partial U_1 U_2}{\partial x_1} + \frac{\partial U_2^2}{\partial x_2} \right] + \frac{\partial}{\partial x_1} \langle \bar{V}_1 u_2 \rangle + \frac{\partial}{\partial x_2} \langle u_2^2 \rangle = -g \cdot \frac{\partial H}{\partial x_2} - \\ - \frac{\partial}{\partial x_2} \langle \bar{V}_2^2 \rangle - \langle \bar{V}_3^2 \rangle - \frac{\partial}{\partial x_1} \langle \bar{V}_1 \bar{V}_2 \rangle + \frac{1}{\rho n} (\tau_{2H} - \tau_{220}). \end{aligned} \quad (8)$$

Математическое описание механизма поперечной циркуляции получено из уравнений движения для поперечного и вертикального направлений координат, уравнения неразрывности и, с учетом гипотезы Буссинёска имеет вид:

$$\begin{aligned} \varphi^2 \left[U_1 \frac{\partial U_2}{\partial x_1} + U_2 \frac{\partial U_2}{\partial x_2} \right] + \varphi \left[U_1 \frac{\partial u_2}{\partial x_1} + u_2 \frac{\partial U_2}{\partial x_2} + U_2 \frac{\partial u_2}{\partial x_2} \right] = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_2} + \\ + \frac{\partial}{\partial x_1} \left\{ \nu \left[\varphi \left(\frac{\partial U_1}{\partial x_2} + \frac{\partial U_2}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right] \right\} + 2 \frac{\partial}{\partial x_2} \left[\nu \left(\varphi \frac{\partial U_2}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} \right) \right] + \\ + \frac{\partial}{\partial x_2} \left[\nu \left(\varphi \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} \right) \right]; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\varphi \left[U_1 \frac{\partial u_3}{\partial x_1} + U_2 \frac{\partial u_3}{\partial x_2} \right] = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_3} + \frac{\partial}{\partial x_1} \left[\nu \left(\varphi \frac{\partial U_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_3}{\partial x_1} \right) \right] +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x_2} \left[\nu \left(\varphi \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} \right) \right] + 2 \cdot \frac{\partial}{\partial x_2} \left[\nu \frac{\partial u_2}{\partial x_2} \right]; \quad (10)$$

$$\varphi \frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \varphi \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} = 0. \quad (11)$$

При получении уравнений (9)-(11) горизонтальные и вертикальная составляющие скорости представляются в виде:

$$\bar{V}_1 = \varphi_1 U_1; \quad \bar{V}_2 = \varphi_2 U_2 + u_2; \quad V_3 = u_3, \quad (12)$$

где φ - закон распределения продольной и поперечной составляющих скоростей.

Кинематическая структура турбулентных трехмерных течений в математической модели квазитрехмерного течения жидкости учитывается следующим образом:

- поперечная циркуляция приводит к перераспределению переноса импульса и скоростей в плане течения и ее эффект учтен в уравнениях плановой задачи (7) - (8);

- распределение локальных осредненных по глубине скоростей учитывается с помощью коэффициента неравномерности распределения скоростей по вертикали - α_n ;

- касательные напряжения сил трения входят в уравнения плана течений и оказывают существенное влияние на кинематическую структуру потока.

Вторая глава посвящена разработке метода решения нестационарной плановой задачи без учета эффекта поперечной циркуляции.

Расчет распределения скоростей в плане течения представляет большой практический интерес. При рассмотрении методов решения плановой задачи необходимо выделить отрывные и безотрывные течения, когда берега русла обтекаются потоком без образования водоворотных зон. Такое разделение течений обусловлено тем, что при наличии водоворотных зон кинематика и динамика турбулентного потока намного сложнее, чем при безотрывных течениях.

Основоположником плановой задачи гидравлики является Н.М.Бернадский, который предложил графоаналитический метод построения ортогональной сетки движения на основе закона "рисунка". Дальнейшее усовершенствование процедуры построения плана течений было предложено А.В.Безизвестных, А.М.Власовед, К.В.Гришаниным, А.В.Караушевым, Н.М.Кулежиной, В.Н.Новоторцевым, Ю.Ф.Прокофьевой, Б.В.Проскуряковым, В.М.Селезневым и другими, на

основе упрощения техники построения "сетки движения" и применения ЭВМ для решения исходных уравнений. Однако, сам процесс реализации данного метода очень громоздок и трудоемок, что затрудняет его широкое применение в проектной практике.

Дальнейшее развитие методов расчета планов безотрывных течений нашло отражение в работах И.И. Леви, А.В. Караушева, И.А. Шеренкова, в которых учитывается динамическое взаимодействие струй, обусловленное касательными турбулентными напряжениями.

При расчете планов течений в формулу для локальных касательных напряжений на дне вводится коэффициент формы русла K_{Φ} , позволяющий выполнить очевидное интегральное условие сохранения импульса сил трения. Значение данного коэффициента можно определять либо на основе натуральных наблюдений скоростной структуры потока, что чрезвычайно сложно в силу ограниченного объема таких исследований, либо из решения плановой задачи равномерных турбулентных потоков. В связи с этим, в работе рассмотрена задача расчета плана течений равномерных турбулентных потоков.

Уравнения, описывающие этот класс течений в двумерной постановке, получены из динамических уравнений плановой задачи (1)-(3), принимая в последних: $U_1 = U$; $U_2 = 0$; $\frac{\partial}{\partial t} = 0$ и $\frac{\partial}{\partial x_1} = 0$:

$$g \frac{\partial h}{\partial x_2} + \frac{\tau_{x_2 z_0}}{\rho h} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle V_x V_x \rangle}{\partial x_2} = 0; \quad (13)$$

$$\frac{\partial U h}{\partial x_2} = 0. \quad (14)$$

Переход к безразмерным переменным

$$\xi = \frac{x_2}{B}; \quad 0 < \xi < 1; \quad \tilde{U} = \frac{U}{V}, \quad (15)$$

позволил получить уравнение динамического "равновесия" в виде:

$$A \frac{d^2 \tilde{U}^2}{d\xi^2} - \frac{f(\xi)}{K_{\Phi}} \tilde{U}^2 + 1 = 0, \quad (16)$$

$$\text{где } A = \frac{A}{B} \frac{C^2}{g} \frac{B}{B}; \quad f(\xi) = \frac{C^2 R}{C^2 R_h} = \left[\frac{R}{R_h} \right]^{2\gamma+1} \cdot \left[\frac{\eta}{\sigma \rho} \right]^2. \quad (17)$$

Решение уравнения (16), с учетом граничных условий, осуществляется методом итераций, так как значения параметров A и K_{Φ} определяются из интегральных условий, в которые входит искомая величина \tilde{U} . Проведенные систематические расчеты распределения скоростей в нестесненных руслах показывают достаточно хорошую сходимость расчетных и наблюдаемых данных.

Явление отрыва потока от обтекаемой им поверхности может

иметь место как при обтекании плавных поверхностей, так и при обтекании тел с острыми кромками. В последнем случае основной причиной отрыва является инерция движущейся жидкости вдоль поверхности обтекаемого тела. Отрыв при обтекании плавных поверхностей возникает вследствие взаимодействия трех факторов: инерции, потока, тормозящего влияния на поток обтекаемой им поверхности и положительного градиента давления.

На рис. 1 показан отрыв пограничного слоя при обтекании поверхности плавной формы. При движении потока в открытых водоемах, естественных и искусственно сжатых руслах наблюдаются явления отрыва потока с образованием водоворотных зон в плане (рис. 2). Эти явления отрыва объясняются теми же причинами, что и отрыв пограничного слоя, обтекающего поверхность плавной формы.

Существующие методы решения плановой задачи отрывных течений, основанные на интегрировании уравнений движения и неразрывности, подразделяются на аналитические и численные.

Аналитические методы решения нашли отражение в работах В. В. Баланина, А. В. Бутакова, И. М. Коновалова, С. Н. Нумерова, В. М. Селезнева и других исследователей. Эти методы основаны на введении ряда допущений и приближений, позволяющих свести уравнения движения к линейным, что в значительной степени обедняет класс решаемых задач.

Численные методы развивались по двум основным направлениям:

- упрощения исходных уравнений и, как следствие, процедуры их реализации путем исключения из них слагаемых, оказывающих несущественное влияние на динамические характеристики потока для определенных классов прикладных задач;

- выделение в потоке отдельных фрагментов с определенными характеристиками течений, которым присуща определенная общность, позволяющих упростить математическую идеализацию и описание физической картины.

К первому направлению следует отнести работы Лидертси, Като, Хагино и других исследователей, и они могут быть рекомендованы для расчетов приливных течений.

Развитие методов второго направления нашло отражение в работах Н. И. Бернадского, Г. В. Востржеца, И. И. Леви, М. А. Михалева, А. Н. Рахманова, А. Г. Соловьевой и других. Наиболее глубокий научный подход к решению задач расчета планов отрывных течений нашел отражение в монографии И. А. Шеренкова. Им предложены методы расчета планов отрывных течений по фрагментам для трех случаев:

1 - известно положение динамической оси и боковых границ

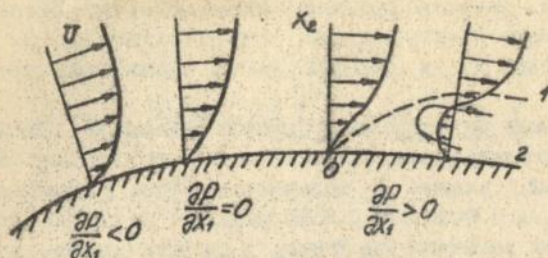
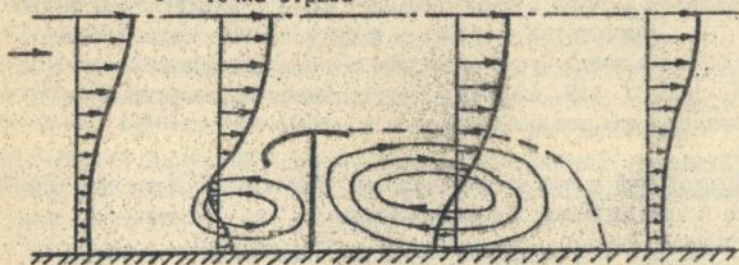


Рис. 1. Отрыв пограничного слоя при обтекании поверхности плавной формы

- 1 - граница циркуляционной зоны отрыва;
- 2 - линия тока в зоне отрыва;
- 0 - точка отрыва



а

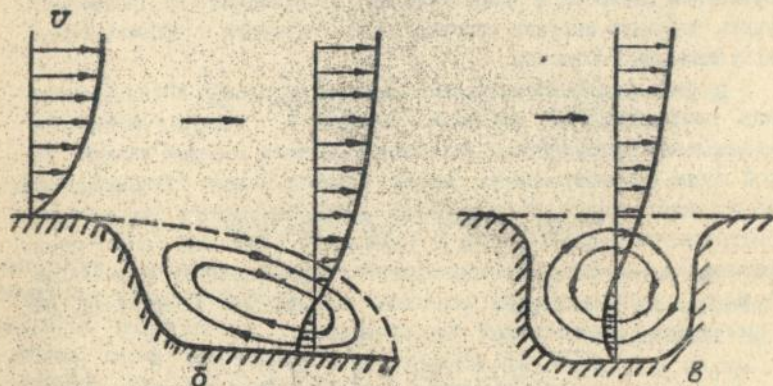


Рис. 2. Отрыв потока и образование водоворотных зон в плане: при обтекании сооружений и дамб /а/, при резком расширении потока /б/ и при обтекании берегового затона или ковша /в/

транзитной струи; 2 - известно положение динамической оси потока в плане, а положение боковых границ струи неизвестно; 3 - положение динамической оси и боковых границ транзитной струи неизвестно.

Разработке метода расчета планов отрывных течений на основе численного интегрирования уравнений движения и неразрывности по всему плану течений, включая и водоворотные зоны, посвящены работы В. М. Лятхера, А. Н. Милитеева, С. Я. Школьников. Метод основан на решении двумерных уравнений Сен-Венана, с использованием для замыкания уравнений, выражающих связь между касательными напряжениями на дне и характеристиками потока. На наш взгляд такой подход к решению задачи расчета отрывных течений нереалистичен в связи с тем, что на линии раздела транзитной струи и водоворотов силы турбулентного динамического взаимодействия между этими областями значительно превосходят силы трения о дно, о чем свидетельствуют обширные теоретические и экспериментальные исследования как в нашей стране, так и за рубежом.

Проведенный в диссертации краткий анализ и обзор методов расчета планов отрывных течений показывает, что практически все существующие методы основаны на использовании постоянного значения горизонтальной турбулентной вязкости, который не учитывает интенсивность турбулентного перемешивания в различных областях отрывных течений. Неучет изменения горизонтальной турбулентной вязкости в плане течения в принципе не позволяет получить реальную картину распределения скоростей и формирования рециркуляционных областей.

В рамках представленных исследований предложен метод расчета планов нестационарных отрывных течений с учетом изменения горизонтальной турбулентной вязкости в области решения задачи. Во второй главе рассматривается метод расчета плана течений без учета эффекта поперечной циркуляции. Это объясняется сложностью рассматриваемой задачи. Поэтому, в уравнениях (7) - (8) опускаются слагаемые, учитывающие эффект поперечной циркуляции и нормальные турбулентные напряжения. Для вычисления касательных напряжений на дне применяется квадратичный закон трения

$$\frac{\tau_{xx}^0}{\rho} = c_f U_x \sqrt{U_1^2 + U_2^2}; \quad \frac{\tau_{yy}^0}{\rho} = c_f U_y \sqrt{U_1^2 + U_2^2}. \quad (16)$$

С учетом гипотезы Буссинеска и зависимостей (18) уравнения нестационарной плановой задачи имеют вид:

$$\frac{\partial U_1}{\partial t} + \alpha_1 \left[\frac{\partial U_1^2}{\partial x_1} + \frac{\partial U_1 U_2}{\partial x_2} \right] = -g \frac{\partial H}{\partial x_1} + \frac{\partial}{\partial x_2} \left[\nu_1 \cdot \frac{\partial U_1}{\partial x_2} \right] +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x_2} \left[\nu_1 \cdot \frac{\partial U_2}{\partial x_1} \right] - \frac{C_1 U_1 \sqrt{U_1^2 + U_2^2}}{K_\Phi h}; \quad (19)$$

$$\frac{\partial U_2}{\partial t} + \alpha_2 \left[\frac{\partial U_1 U_2}{\partial x_1} + \frac{\partial U_2^2}{\partial x_2} \right] = -g \frac{\partial H}{\partial x_2} + \frac{\partial}{\partial x_1} \left[\nu_1 \cdot \frac{\partial U_1}{\partial x_2} \right] +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x_1} \left[\nu_1 \cdot \frac{\partial U_2}{\partial x_1} \right] - \frac{C_2 U_2 \sqrt{U_1^2 + U_2^2}}{K_\Phi h}; \quad (20)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial U_1 h}{\partial x_1} + \frac{\partial U_2 h}{\partial x_2} = 0. \quad (21)$$

В первой главе диссертации [уравнения (5)-(6)] приведена стандартная трехмерная модель турбулентности, но для решения системы уравнений (19) - (21) необходимо использовать значения ν_1 , осредненные по глубине. В. Родн принял допущение о том, что для осредненных по глубине величин локальное состояние турбулентности может быть охарактеризовано осредненными по глубине кинетической энергией турбулентности K и скоростью ее диссипации ϵ , а осредненные по глубине коэффициенты турбулентной вязкости ν_1 можно выразить через эти параметры с помощью соотношения:

$$\nu_1 = C_\mu \frac{K^2}{\epsilon}. \quad (22)$$

Изменение осредненных по глубине величин K и ϵ определяется из следующих уравнений:

$$U_1 \frac{\partial K}{\partial x_1} + U_2 \frac{\partial K}{\partial x_2} = \frac{\partial}{\partial x_1} \left[\frac{\nu_1}{\sigma_k} \cdot \frac{\partial K}{\partial x_1} \right] + \frac{\partial}{\partial x_2} \left[\frac{\nu_1}{\sigma_k} \cdot \frac{\partial K}{\partial x_2} \right] + P_h +$$

$$+ P_{kv} - \epsilon; \quad (23)$$

$$U_1 \frac{\partial \epsilon}{\partial x_1} + U_2 \frac{\partial \epsilon}{\partial x_2} = \frac{\partial}{\partial x_1} \left[\frac{\nu_1}{\sigma_\epsilon} \cdot \frac{\partial \epsilon}{\partial x_1} \right] + \frac{\partial}{\partial x_2} \left[\frac{\nu_1}{\sigma_\epsilon} \cdot \frac{\partial \epsilon}{\partial x_2} \right] + C_1 \frac{\epsilon}{K} P_h +$$

$$+ P_{\epsilon v} - C_2 \frac{\epsilon^2}{K}; \quad (24)$$

где член

$$P_h = \nu_1 \left[2 \left[\frac{\partial U_1}{\partial x_1} \right]^2 + 2 \left[\frac{\partial U_2}{\partial x_2} \right]^2 + \left[\frac{\partial U_1}{\partial x_2} + \frac{\partial U_2}{\partial x_1} \right]^2 \right]$$

описывает генерацию турбулентности за счет взаимодействия турбулентных напряжений и горизонтальных градиентов осредненной скорости. Величины K и ϵ не являются строго осредненными по глубине, как и коэффициент турбулентной вязкости ν_1 , но K - ϵ уравнения (23)-(24) можно все-таки рассматривать как осредненную по глубине форму трехмерных уравнений с учетом допущения, что все члены, связанные с неоднородностью вертикальных профилей

описываемых величин, вошли в источники член P_{kV} и $P_{\epsilon V}$.

Основной вклад в P_{kV} и $P_{\epsilon V}$ создают значительные вертикальные градиенты скорости в придонной области. При взаимодействии с относительно большими турбулентными касательными напряжениями в указанной области эти градиенты генерируют турбулентную энергию, которая сильно зависит от шероховатости дна. По рекомендациям, приведенным в работах В. Роди, дополнительные источники член, с учетом допущения о подобии вертикальных профилей скоростей, выражены через динамическую скорость U_T с помощью соотношений:

$$P_{kV} = C_k \frac{U_T^3}{h}, \quad P_{\epsilon V} = C_{\epsilon} \frac{U_T^4}{h^2}. \quad (25)$$

Приспособление к- ϵ модели для вычислений осредненных по глубине величин носит скорее эмпирический характер, однако расчеты, проводимые В. Роди, Б. Е. Лаундером, Д. Е. Сполдингем, А. К. Растиги показывают достаточно высокую степень сходимости с данными лабораторных опытов и расчетами, проведенными другими авторами.

Уравнения плановой задачи (19) - (21) относятся к нелинейным уравнениям гипербола-параболического типа (по терминологии В. М. Ковени и Н. Н. Яненко - не вполне параболическая система уравнений). Эта система уравнений в общем случае не может быть реализована аналитическими методами. Вследствие этого необходимо применение численных методов для реализации математических моделей такого типа.

На основании проведенного в работе анализа численных методов решения нелинейных задач гидрогазодинамики в качестве численной модели для реализации системы уравнений плановой задачи выбрана модифицированная схема Мак-Кормака с расщеплением дифференциальных уравнений по времени и пространственным переменным. Эта схема исследована многими авторами в применении к различным классам задач и оценивается ими очень высоко (А. М. Блохин, Р. Д. Алаев, А. Л. Дорфман, Р. Гарсия, П. Кутлер, Мак-Кормак). Она обладает следующими свойствами:

- 1) явная консервативная схема;
- 2) двухшаговая, типа предиктор-корректор;
- 3) трехточечная двухуровневая (решение f_i^{n+1} зависит от трех значений на уровне n);
- 4) второй порядок точности по времени и пространству.

Конечно-разностный метод является консервативным, если при суммировании разностных уравнений по всем узлам сетки получаются

выражения, которые содержат только сеточные величины на границах области. Это свойство можно придать аппроксимирующей разностной системе, полученной только на основе дивергентной формы исходных дифференциальных уравнений.

Метод расщепления был предложен В.М.Ковеня, Н.Н.Яненко, Г.И.Марчук для решения стационарных задач на основе принципа установления. Для нестационарных задач газовой динамики экономичные схемы расщепления удобно строить применяя метод предиктор-корректор. Идея метода принадлежит В.М.Ковеня, Г.И.Марчук и состоит в следующем.

Каждое из расщепленных уравнений, в общем случае, некорректно, но полная расщепленная система является корректной. Для данного двумерного случая достаточно сложный дифференциальный оператор расщепляется на последовательность более простых. Процесс расщепления дает уменьшение количества вычислений на каждом временном шаге и достижение второго порядка точности по времени и пространству при использовании симметричной последовательности одномерных конечно-разностных операторов.

Учитывая сложность поставленной задачи с математической точки зрения, на первом этапе рассматривается течение жидкости в прямоугольном русле (постоянной ширины) с разделением потока на русловую и пойменные части, для которых характерны различные гидравлические характеристики потока и значения коэффициентов шероховатости.

Для решения системы уравнений (19) - (21) предлагается использовать метод дифференциального расщепления (канальное расщепление). Расщепленная система имеет вид:

в направлении оси X_1 :

$$\frac{\partial U_1}{\partial t} + \alpha_1 \frac{\partial U_1^2}{\partial X_1} = -g \frac{\partial H}{\partial X_1} + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial X_1} \left[\nu \frac{\partial U_1}{\partial X_1} \right] - \frac{C_f U_1 \sqrt{U_1^2 + U_2^2}}{K_\phi \cdot h}; \quad (25)$$

$$\frac{\partial U_2}{\partial t} + \alpha_2 \frac{\partial U_1 U_2}{\partial X_1} = \frac{\partial}{\partial X_1} \left[\nu \frac{\partial U_1}{\partial X_1} \right] + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial X_1} \left[\nu \frac{\partial U_1}{\partial X_2} \right]; \quad (27)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial U_1 h}{\partial X_1} = 0 \quad (28)$$

в направлении оси X_2 :

$$\frac{\partial U_1}{\partial t} + \alpha_1 \frac{\partial U_1 U_2}{\partial X_2} = \frac{\partial}{\partial X_2} \left[\nu \frac{\partial U_1}{\partial X_1} \right] + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial X_2} \left[\nu \frac{\partial U_2}{\partial X_2} \right]; \quad (29)$$

$$\frac{\partial U_2}{\partial t} + \alpha_2 \frac{\partial U_2^2}{\partial X_2} = -g \frac{\partial H}{\partial X_2} + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial X_2} \left[\nu \frac{\partial U_1}{\partial X_2} \right] - \frac{C_f U_2 \sqrt{U_1^2 + U_2^2}}{K_\phi \cdot h}; \quad (30)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial U_2 h}{\partial X_2} = 0. \quad (31)$$

Решение в момент времени $(n+1)\Delta t$ для расчетной точки $(1, j)$ получается применением модифицированной конечно-разностной схемы Мак-Кормака с использованием метода предиктор-корректор в виде:

$$U_{i,j}^{n+1} = L_{n2} \left[\frac{\Delta t}{2} \right] \cdot L_{n1} \left[\frac{\Delta t}{2} \right] \cdot L_{n1} \left[\frac{\Delta t}{2} \right] \cdot L_{n2} \left[\frac{\Delta t}{2} \right] U_{i,j}^n, \quad (32)$$

где L_{n1}, L_{n2} - соответствующие одномерные разностные операторы.

Угруппированная блок-схема решения нестационарной плановой задачи отрывных течений приведена на рис. 3.

При расчете двумерных нестационарных течений в области со сложной геометрией в плане, получение разностных уравнений существенно усложняется. В связи с этим, в работе предложен метод, позволяющий при помощи соответствующего преобразования координат свести решение уравнений плановой задачи в полосу переменной ширины, т.е. в области с подвижными границами, к решению этих уравнений в полосе постоянной ширины (рис. 4):

$$X = X_1; \quad t_1 = t; \quad \eta = \frac{X_2 - X_2(1)}{X_2(N) - X_2(1)} = \frac{X_2 - X_2(1)}{B}, \quad (33)$$

где $B = X_2(N) - X_2(1)$ - переменная ширина потока по урезу воды.

На основании предложенного преобразования координат, в работе получены уравнения нестационарной плановой задачи отрывных течений и к-ε модели турбулентности, для величин осредненных по глубине, в "новой" системе координат.

Для нахождения распределения значений коэффициента турбулентной вязкости в области решения задачи необходимо решить систему уравнений двухпараметрической к-ε модели турбулентности. Одним из возможных путей решения поставленной задачи является применение метода установления. Идея такого подхода состоит в том, что задают некоторые произвольные начальные условия и стационарные (или стремящиеся к ним при увеличении времени) граничные условия, а затем решают поставленную нестационарную задачу до тех пор, пока решения не перестанут меняться.

В соответствии с рекомендациями ряда авторов за момент установления можно принимать тот момент времени, когда при сравнении между собой решений, получаемых для различных моментов времени, поток какой-либо величины изменяется слабо и ошибка не накапливается. При решении уравнений (23) - (24) в качестве характеристики целесообразно применять интегральные значения коэффициента турбулентной вязкости в каждом поперечном створе области решения задачи. Процесс можно считать установившимся, если выполняется соотношение:

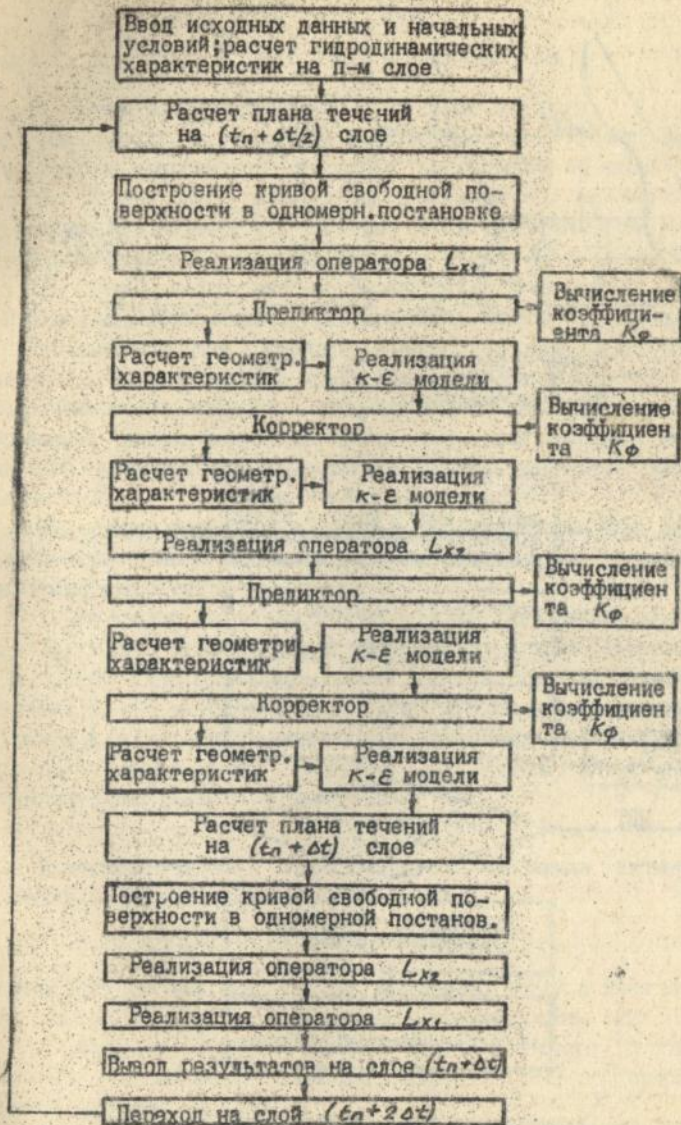


Рис. 3. Укрупненная блок - схема решения нестационарной плановой задачи отрывных течений

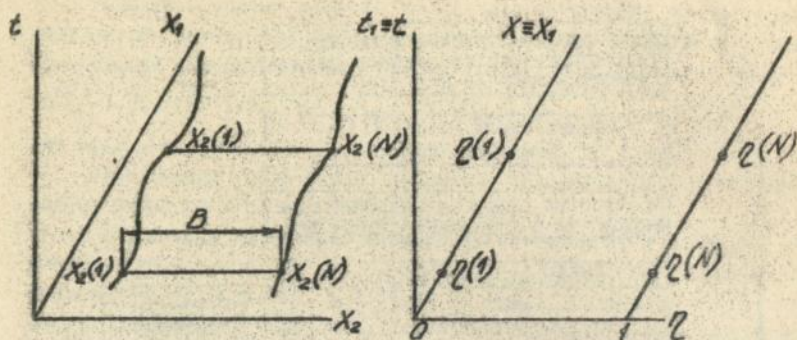


Рис. 4. Схема к расчету плана течений:
 а - в координатах X_1, X_2, t ;
 б - в координатах X, η, t_1 .

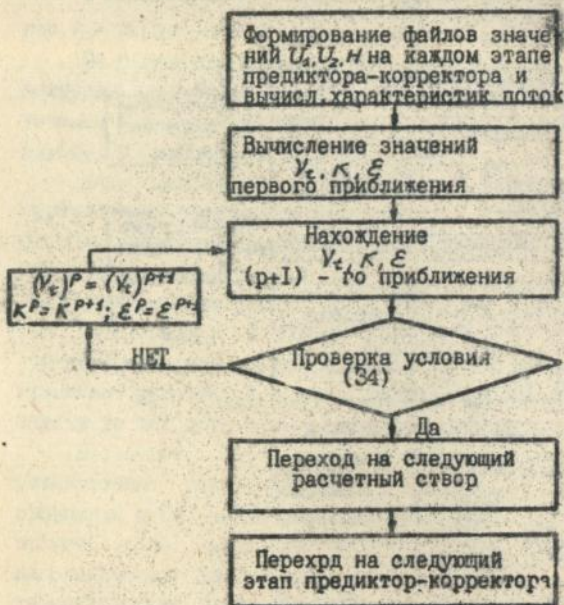


Рис. 5. Укрупненная блок-схема решения уравнений двухпараметрической модели турбулентности

$$\max_1 \left| \int_0^B (\nu)_i^{p+1} dx_z - \int_0^B (\nu)_i^p dx_z \right| < \varepsilon \left| \int_0^B (\nu)_i^p dx_z \right|, \quad (34)$$

где ε - заданная точность; $(p+1); p$ - номера итераций.

Для нахождения изменения осредненных по глубине значений кинетической энергии турбулентности K и скорости ее диссипации ε методом установления необходимо рассматривать вспомогательную нестационарную задачу, т.е. в левые части уравнений (23) и (24) необходимо добавить соответствующие слагаемые $\frac{\partial K}{\partial t}$ и $\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}$.

На основе анализа различных разностных схем (явная, неявная и переменных направлений), проведенного в работе С.К. Годунова и В.С. Рябенского, для решения задач методом установления целесообразно использовать явную схему, как более простую, так и сопоставимую по затратам арифметических действий со схемой переменных направлений. Временной шаг для задач механики жидкости, решаемых методом установления, рекомендуется принимать равным 0,01с.

Реализация уравнений k - ε модели турбулентности для величин, осредненных по глубине, производится в следующей последовательности.

1. На каждом этапе реализации конечно-разностных операторов L_{kz} и $L_{\varepsilon z}$ вычисляются значения составляющих вектора скорости U_x и U_z и отметки свободной поверхности потока H . Для определения значений k , ε и ν первого приближения используются рекомендации В.Роди и А.К.Растоги. Осредненное по глубине значение скорости диссипации кинетической энергии турбулентности связано с гидравлическим уклоном зависимостью:

$$\varepsilon = g \cdot i \cdot U_x \quad (35)$$

Экспериментальные исследования и численные эксперименты Дж.Лаундера показывают, что соотношение

$$\frac{\nu_x}{U_\tau \cdot h} = 0.0765; \quad \nu = 0.0765 U_\tau \cdot h \quad (36)$$

справедливо как для закрытых, так и открытых русел, а кинетическая энергия турбулентности определяется по зависимости (22).

2. Используя значения величин ν , k и ε первого приближения в области решения задачи, находим значения $(p+1)$ -го приближения искомого величин.

3. В каждом расчетном створе для нахождения момента установления проверяется выполнение условия (34).

Укрупненная блок-схема решения уравнений двухпараметрической модели турбулентности приведена на рис.5.

Расчет планов установившихся отрывных течений является одной из сложнейших задач гидродинамики, и разработка эффективного метода его реализации является сложной задачей как с физической, так и с математической точек зрения. В связи с этим, целесообразно использовать накопленный теоретический и практический материал в области методов расчета планов нестационарных отрывных течений и распространить его на стационарные течения. Эффективным инструментом реализации такого подхода и является метод установления. Такой подход оправдан и с физической точки зрения, так как установившееся течение жидкости является результатом установления нестационарных течений.

В качестве скалярной характеристики течения наиболее выгодным оказывается применять расход через поперечный створ в области течения. Тогда за момент установления принимается тот момент, когда выполняется соотношение

$$\max |Q_n - Q| < \varepsilon |Q|.$$

Преимуществами предлагаемого метода являются:

1. Универсальность алгоритма как для стационарных, так и для нестационарных течений.

2. Схемы, используемые для конечно-разностной аппроксимации исходных дифференциальных уравнений, обеспечивают второй порядок точности аппроксимации.

3. Применение данного метода позволяет существенно сократить время решения нестационарных задач. Во многих инженерных задачах практический интерес представляют результаты расчета планов течений только на определенных участках ветвей подъема и спада гидрографа паводка. В этом случае выделяется интересующий участок гидрографа паводка и на начальном слое участка гидрографа расчет плана течений производится методом установления, а на последующих временных слоях рассчитывается план неустановившихся отрывных течений. Такой прием позволяет сократить время получения интересующих результатов в несколько раз.

Для однозначной характеристики процесса движения жидкости и переноса компонент турбулентных напряжений возникает необходимость в задании дополнительных данных, которые в простейшем случае состоят из начальных и граничных (краевых) условий.

Решение систем расщепленных уравнений плановой задачи (26) -

31) и уравнений двухпараметрической $k-\epsilon$ модели турбулентности (23) - (24) для русел прямоугольного очертания в плане находится в области $G = (0 < t < T; l_1 < x_1 < l_2; l_3 < x_2 < l_4)$, и им в соответствие задаются начальные условия и граничные условия, выбор и обоснование которых детально рассмотрены в работе.

Разработанный во второй главе метод расчета планов нестационарных и стационарных отрывных течений не учитывает эффекта вторичных течений поперечной циркуляции, хотя, как отмечалось выше, эти течения оказывают существенное влияние на формирование скоростной структуры потока, профили свободной поверхности и перенос компонент турбулентных напряжений.

Третья глава посвящена разработке методов расчета вторичных течений поперечной циркуляции и планов нестационарных отрывных течений с учетом эффекта поперечной циркуляции.

Естественные водоемы редко имеют прямоугольное русло и для них характерно извилистое очертание в плане. При делении потока на рукава, слиянии потоков, впадении притока в реку, при движении речного потока в зоне влияния мостовых переходов, при обтекании речных полуостровов, на криволинейных участках оросительных и осушительных каналов, при возведении различного рода водозаборных сооружений на реках имеет место плановое искривление струй. В связи с этим, изучение закономерностей течения искривленного потока представляет огромный научный и практический интерес, а теория движения потока в искривленных руслах является основой теории русловых процессов, происходящих как в естественных, так и искусственно сжатых руслах (рис. 6).

Основоположником изучения поперечной циркуляции на повороте русла является русский ученый Н.С. Лежневский, который впервые экспериментально обнаружил в потоке наличие вторичных течений поперечной циркуляции.

Дальнейшее развитие теоретических и экспериментальных методов изучения поперечной циркуляции нашло отражение в работах А.К. Ананяна, М. Асканю, О.Ф. Васильева, Ю.Д. Власенко, Х. Де Вренд, И.С. Громеко, Н.Е. Луковского, А.В. Караушева, Ж. Кеннеди, И.И. Кирриенко, А.С. Климук, В.М. Маккавеева, А.Я. Миловича, С.А. Мокмор, И. Мурамото, М.В. Пяталова, И.Л. Розовского, М. Фалкон, И.А. Шеренкова, А. Шукри и других. Наиболее полно в теоретическом отношении вопросы вторичных течений поперечной циркуляции решены А.К. Ананяном, И.Л. Розовским, И.А. Шеренковым.

Для открытых потоков с рециркуляционными зонами выбор

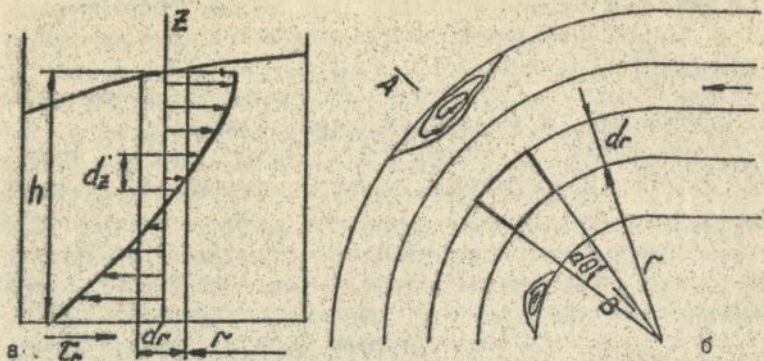


Рис. 6. Поперечная циркуляция и поперечный уклон поверхности на повороте русла /193/:
 а - разрез по АВ; б - план; I - области возможного образования водоворотов

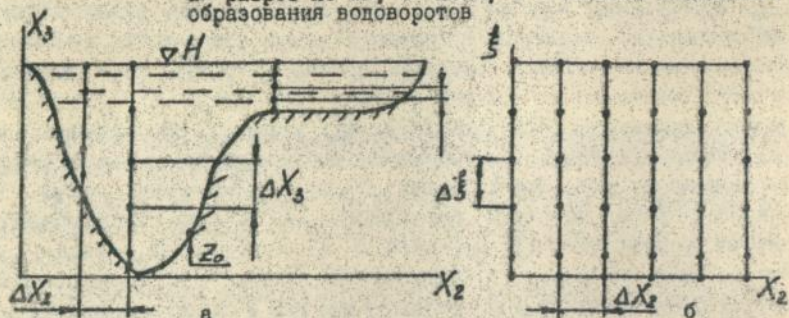


Рис. 7. Схема разбивки поперечного сечения на вертикали и расчетные точки при решении уравнений поперечной циркуляции: а - поперечное сечение потока с поймами в физических координатах X_2, X_3 ; б - поперечное сечение потока в координатах X_2, ξ .

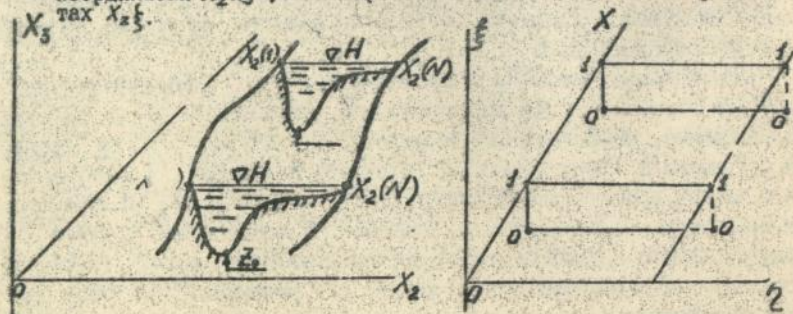


Рис. 8. Преобразование русла произвольной формы в координатах X_1, X_2, X_3 в область прямоугольной формы в координатах X, η, ξ

криволинейной системы координат, обеспечивающий совпадение направления продольной координаты с основным направлением вдоль всего плана течения, становится практически невозможным. Наиболее простой и удобной для такого класса гидромеханических задач является декартова система координат. В связи с изложенным выше, целью настоящей главы является разработка методов расчета вторичных течений поперечной циркуляции и планов нестационарных отрывных течений с учетом эффекта поперечной циркуляции.

Учет эффекта вторичных течений поперечной циркуляции при решении плановой задачи предопределяет необходимость введения в уравнения плана течений и нормальных турбулентных напряжений, которые в двумерной постановке выражаются разностью средних по глубине нормальных напряжений по вертикальному и горизонтальному направлениям:

$$\frac{\partial}{\partial x_1} (\overline{V_1 u_2}) - \overline{V_1' u_2'} \text{ и } \frac{\partial}{\partial x_2} (\overline{V_2 u_2}) - \overline{V_2' u_2'} \quad (37)$$

Слагаемое $\overline{V_1 u_2}$, характеризующее конвективный перенос импульса вторичным течением поперечной циркуляции может быть представлено в виде:

$$\overline{V_1 u_2} = \frac{U_1}{H} \int_{z_0}^H \phi \cdot u_2 dx_3; \quad \langle u_2 \rangle = 0; \quad \langle u_2^2 \rangle = \int_{z_0}^H u_2^2 dx_3 \quad (38)$$

Уравнения плана течений с учетом эффекта поперечной циркуляции и нормальных турбулентных напряжений идентичны уравнениям движения (7)-(8) и неразрывности (3) и они могут применяться для расчета планов течений в руслах постоянной ширины. При расчете планов течений в областях с "подвижными" границами рекомендуется применять метод преобразования координат, как для уравнений плановой задачи, так и к-ε модели турбулентности.

Реализация уравнений плана неустановившихся отрывных течений с учетом эффекта вторичных течений поперечной циркуляции в руслах прямоугольного и произвольного очертаний в плане выдвигает задачу нахождения слагаемых, учитывающих вторичные течения поперечной циркуляции и нормальные турбулентные напряжения. Для их вычисления необходимо иметь эмпир распределения поперечных составляющих скоростей вторичных течений u_2 и u_3 , значения которых можно определить из уравнений для расчета вторичных течений поперечной циркуляции.

Математическое описание механизма вторичных течений поперечной циркуляции получено в первой главе диссертации и представлено уравнениями (9) - (11). Для нахождения распределения коэффициента турбулентной вязкости в области $D_1 = \{1_1 < x_1 < 1_2; 1_2 < x_2 < 1_3;$

$H < x_3 < z_0$) используется стандартная $k-\epsilon$ модель турбулентности, которая представлена уравнениями (5) и (6), так как для решения этой задачи необходимо знать распределения коэффициентов горизонтальной и вертикальной турбулентной вязкости.

Полученная система уравнений (9)-(11), (5)-(6) является замкнутой относительно пяти неизвестных функций u_2 , u_3 , p , k и ϵ . Решение уравнений (9)-(11) осуществляется следуя в основном идеям, использованным В.М.Маккаевым, А.К.Ананяном, И.Л.Розовским, И.А.Шаренковым. Полагая, что в уравнении поперечного "равновесия" распределение давления можно принять гидростатическим, появляется возможность решения уравнения (9) независимо от уравнений (10) и (11), а затем из уравнения неразрывности (11) можно определить величину $u_3(x_1, x_2, x_3)$. Величины U_1 и U_2 в этих уравнениях принимаются известными в первом приближении из решения плановой задачи без учета эффекта поперечной циркуляции, а законом распределения скоростей по глубине потока ϕ задается.

Численное решение уравнений поперечной циркуляции в произвольной и меняющейся вдоль координаты x_1 области решения выполнить трудно вследствие громоздкости вычислительных операций. В связи с этим, в работе предложено для численного решения вышеуказанных уравнений выделить две самостоятельные задачи: 1 - поток постоянной ширины (прямоугольного очертания в плане) с поперечным сечением произвольной формы и 2 - поток переменной ширины (произвольного очертания в плане) с поперечным сечением произвольной формы.

Для решения первой задачи система координат $X_1 X_2 X_3$ заменяется "новой" системой координат $X_1 X_2 \xi$ (рис.7):

$$X_1 = X_1; \quad X_2 = X_2; \quad \xi = \frac{X_3 - z_0}{H - z_0} = \frac{X_3 - z_0}{H}; \quad 0 < \xi < 1. \quad (39)$$

Для решения второй задачи система координат X_1, X_2, X_3 заменяется "новой" системой координат x, η, ξ (рис.8):

$$X = x; \quad \eta = \frac{X_2 - X_2(1)}{B}; \quad 0 < \eta < 1; \quad \xi = \frac{X_3 - z_0}{H - z_0} = \frac{X_3 - z_0}{H};$$

$$0 < \xi < 1. \quad (40)$$

В работе получены уравнения поперечной циркуляции и стандартной трехмерной $k-\epsilon$ модели турбулентности для решения первой и второй задач в "новых" координатах.

При решении уравнений поперечной циркуляции и модели турбулентности применяется метод установления. В качестве критериев для определения момента установления принимаются соотношения:

при расчете скоростей вторичных течений поперечной циркуляции

$$\int_{z_0}^H u_z dx_a = 0; \max_j \left| \int_{z_0}^H (u_z)^{p+1}_k dx_a - \int_{z_0}^H (u_z)^p_k dx_a \right| \leq \varepsilon \left| \int_{z_0}^H (u_z)^p_k dx_a \right| \quad (41)$$

при решении уравнений стандартной трехмерной $k-\varepsilon$ модели турбулентности

$$\max_j \left| \int_{z_0}^H (\nu_k)^{p+1} dx_a - \int_{z_0}^H (\nu_k)^p dx_a \right| \leq \varepsilon \left| \int_{z_0}^H (\nu_k)^p dx_a \right|. \quad (42)$$

Для аппроксимации дифференциальных операторов разностными применяется явная схема, причем первые производные по пространственным переменным аппроксимируются с помощью центральных разностей, вторые производные с помощью разностей вперед и назад $-\Delta_x^+[\Delta_x^-(\dots)]$, смешанные - комбинацией разностей вперед и центральных разностей, а временные производные - с помощью разностей вперед.

Для нахождения вертикальной составляющей скорости вторичных течений поперечной циркуляции используется уравнение неразрывности.

При расчете вторичных течений поперечной циркуляции и решении стандартной трехмерной $k-\varepsilon$ модели турбулентности задаемся следующими граничными условиями, исходя из физических соображений:

- на дне ($\xi = 0$):

$$u_a = 0; \quad \nu_k = 0; \quad k = 0; \quad \varepsilon = 0; \quad u_z = 0 \quad (43)$$

- на свободной поверхности потока ($\xi = 1$):

$$\frac{\partial u_z}{\partial \xi} = 0; \quad \frac{\partial k}{\partial \xi} = 0; \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial \xi} = 0; \quad u_a = 0; \quad (44)$$

- на свободных границах составляющие скорости поперечной циркуляции и характеристики турбулентности принимаются равными 0.

- на жестких границах:

$$u_z \Big|_{xz(1); xz(N)} = 0; \quad u_a \Big|_{xz(1); xz(N)} = 0; \quad (45)$$

$$K_c = \frac{U_\tau^2}{\sqrt{C_\mu}}; \quad \varepsilon_c = \frac{U_\tau^3}{\alpha(x_{z2})} \quad (46)$$

Расчет плана неустановившихся отрывных течений с учетом эффекта поперечной циркуляции и нормальных турбулентных напряжений в руслах прямоугольной и произвольной формы в плане с поперечными сечениями произвольного очертания производится в следующей последовательности:

1. На каждом временном шаге гидр. графа рассчитывается план течений без учета эффекта поперечной циркуляции, в результате находятся поля скоростей U_1, U_2 , и отметок свободной поверхности H .

2. Рассчитываются скорости вторичных течений поперечной циркуляции $u_2(x_1, x_2, x_3)$ и $u_3(x_1, x_2, x_3)$.

3. Зная распределение скоростей поперечной циркуляции u_2 и

U_1 и коэффициент турбулентной вязкости μ , вычисляются слагаемые (37) и (38).

4. Рассчитывается план течений с учетом эффекта поперечной циркуляции с учетом слагаемых (37) и (38), в результате получаем распределение скоростей U_1 , U_2 и отметок свободной поверхности с учетом эффекта вторичных течений поперечной циркуляции и нормальных турбулентных напряжений.

5. Переходим на следующий временной шаг гидрографа паводка и ведем расчет плана течений по вышеприведенному алгоритму.

В четвертой главе рассмотрена двумерная модель расчета размывов русел.

Объективная необходимость обуславливает возведение различных сооружений на реках, каналах, морских побережьях, что приводит к изменению гидрологического режима и интенсификации русловых деформаций. Эти обстоятельства выдвигают актуальную практическую задачу — рассмотрение процесса воздействия сооружений на поток, распределение в нем скоростей и на процессы формирования речного русла, которые в конечном итоге и предопределяют устойчивость, надежность и долговечность возводимых сооружений. Поэтому в рамках настоящих исследований ставится задача прогноза тех изменений в режиме реки, которые произойдут в результате реализации проекта сооружения.

Существующие методы расчета деформаций русел можно условно разделить на гидролого-морфометрические и гидромеханические.

В методах гидролого-морфометрического направления рассматривается интегральный эффект взаимодействия потока и поверхности русла, для расчета которого используются различные морфометрические зависимости, полученные путем статистической обработки натуральных русловых наблюдений. Морфометрические методы прогноза русловых деформаций освещены в работах В.С. Алтунина, С.Г. Алтунина, И.А. Бузунова, А.Н. Крошкина, В.С. Лалшенкова, Н.И. Маккавеева, Н.А. Ржаницына, В.К. Рабковой, В.Ф. Талмаза и других.

Методы гидромеханического направления основываются на рассмотрении механизма гидромеханического взаимодействия движущейся воды и грунта, и сводятся к совместному решению систем основных уравнений динамики русловых потоков. Среди методов этого направления нашли применение методы В.Н. Гончарова, И.И. Леви, Л.Н. Лалина, А.В. Караушева, И.А. Кузьмина, К.И. Россинского. К этому же направлению относятся и методы расчета деформаций подмостовых русел.

Основоположником развития методов мостовой гидравлики является

Н. А. Белелюбский. На основе выдвинутого им постулата было предложено рассчитывать глубину размыва русел под мостом исходя из значений бытовой скорости русла.

Дальнейшее развитие постулата Н. А. Белелюбского нашло отражение в работах А. М. Фролова, А. А. Каншина, М. Ф. Срибного, Б. В. Болдакова. Разработке методов расчета общего размыва искусственно сжатых русел посвящены работы А. М. Латышенкова, О. В. Андреева, Л. Л. Лиштвана, И. И. Херхеулидзе.

Наиболее разработанным и апробированным методом расчета общих деформаций подмостовых русел в настоящее время является метод О. В. Андреева, основанный на решении уравнения баланса наносов, описывающего развитие общих русловых деформаций, независимо от их причины. Дальнейшее развитие данного метода нашло отражение в работах учеников школы О. В. Андреева.

Однако, достаточно высокий научный уровень результатов исследований школы О. В. Андреева на современном этапе не может удовлетворить научные и практические запросы мостовой гидравлики. Основными причинами являются:

- расчет общих деформаций проводится в одномерной постановке, что в значительной степени схематизирует все явления и процессы, происходящие в зоне влияния мостовых переходов;

- при расчетах не учитывается поперечный перенос наносов и влияние вторичных течений поперечной циркуляции на транспорт наносов;

- точность и обоснованность методов расчета транспортирующей способности потока вызывает определенную неуверенность, т.к. эти методы не имеют глубокого теоретического обоснования и в основном базируются на данных лабораторных и натурных исследований.

Вышеизложенные обстоятельства и причины предопределили переход от одномерных моделей расчета русловых деформаций к двумерным.

Подвижность твердых границ потока обуславливает необходимость введения в состав уравнений динамики русловых потоков особое граничное условие, устанавливающее связь между изменениями русла и транспортом наносов. Это граничное условие известно под названием уравнения деформаций и представляет собой основную математическую зависимость теории руслового процесса.

В работе получено двумерное уравнение баланса наносов, которое в дифференциальной форме устанавливает связь между деформациями дна и перемещением наносов и имеет вид:

$$\frac{\partial z_{01}}{\partial x_1} + \frac{\partial z_{02}}{\partial x_2} + (1-\varepsilon) \cdot \frac{\partial z_0}{\partial t} + \frac{\partial(hS)}{\partial t} = 0. \quad (47)$$

где z_0 - отметка дна; ε - коэффициент пористости донных отложений; q_{x1} , q_{x2} - удельные расходы наносов соответственно в направлениях x_1 и x_2 .

Исследования, проведенные М.А. Великановым, В.Н. Гончаровым, К.В. Гришаниным, показали, что последний член левой части уравнения (47) может быть отброшен в силу его малости по сравнению с остальными, и тогда уравнение баланса наносов в двумерной постановке имеет вид:

$$(1-\varepsilon) \cdot \frac{\partial z_0}{\partial t} + \frac{\partial q_{x1}}{\partial x_1} + \frac{\partial q_{x2}}{\partial x_2} = 0. \quad (48)$$

Для замыкания системы основных уравнений динамики русловых потоков необходимо ввести соотношения для расчета транспортирующей способности потока, так как достоверность прогноза русловых деформаций в значительной степени зависит от способа определения расхода руслоформирующих наносов. Все методы расчета транспорта наносов можно разделить на две большие группы: методы с разделением наносов на донные и взвешенные, и методы определения суммарного расхода.

При определении транспорта донных наносов можно выделить в основном три подхода: детерминистический, вероятностный и концепция грядового движения наносов.

В детерминистическом подходе рассматривается движение однородных крупнозернистых частиц на дне равномерного потока при квадратичном режиме сопротивлений. К методам детерминистического направления относятся: С.Х. Абальянца, И.В. Егизарова, И.И. Леви, Мейер-Петера, Мюллера, Филдса, Г.И. Шамова.

К вероятностному подходу относятся работы Г.Эйнштейна, К. Брауна.

На концепции грядового движения наносов основаны зависимости А.Е. Михинова, В.Ф. Пушгрева, Б.Ф. Смищенко.

Особое место среди существующих методов расчета транспорта донных наносов занимает метод Ван Райна. В соответствии с этим методом транспорт донных наносов осуществляется качением и сальтацией частиц вдоль поверхности дна. Удельный расход донных наносов определяется как произведение скорости донной частицы (u_g), высоты их сальтации (b_g) и объемной концентрации частиц в придонном слое (c_g):

$$q_g = u_g \cdot c_g \cdot b_g. \quad (49)$$

Выражения для u_g , c_g , b_g получены в результате численного решения уравнений движения дискретных частиц над ровным дном.

Имеющиеся в литературе рекомендации по расчету транспортирующей способности потока по отношению к взвешенным наносам можно разделить на две группы. К первой принадлежат работы, в которых предлагаются эмпирические зависимости, полученные на основе обобщения лабораторных и натуральных данных. Сводка эмпирических формул приведена в работах А. В. Караушева и И. И. Леви. Результаты расчетов по различным формулам этой группы могут расходиться на десятки, а то и сотни процентов, так как эти формулы дают удовлетворительные результаты лишь для условий, при которых они получены.

Ко второй группе формул транспорта взвешенных наносов относятся зависимости, полученные в результате комплексных работ (теоретических и экспериментальных). Широкое применение в динамике русловых потоков получила диффузионная теория движения взвешенных наносов. Развитие эта теория нашла в работах М. А. Великанова, Г. И. Баренблатта, В. Ванони, А. В. Караушева, В. М. Маккавеева, Х. Рауза.

Среди методов расчета транспортирующей способности взвешенных наносов необходимо отметить метод Ван Райна, который включает основные достижения русловой гидравлики в области изучения движения русловых наносов. В основе метода лежит учет различных факторов, таких как:

- наличие грядовой структуры донного рельефа дна;
- зависимость параметров диффузии частиц от их концентрации в потоке;
- неравномерность распределения коэффициента диффузии по глубине потока.

Основные зависимости Ван Райном получены в результате численного интегрирования уравнения диффузии. Зависимость для вычисления удельного расхода взвешенных наносов имеет вид:

$$q_{вз} = P \cdot U \cdot h \cdot C_0 \quad (50)$$

В работе для расчета транспортирующей способности потока применяется метод Ван Райна как наиболее полно разработанный в теоретическом и прикладном аспектах.

Расчет плановых деформаций русел производится на основе решения двумерного уравнения баланса наносов (48). Данное уравнение является нелинейным дифференциальным уравнением первого порядка гиперболического типа.

Для решения данного нелинейного двумерного уравнения в работе предложено использовать явный метод расщепления по пространственным переменным и времени. Разностные операторы $L_{x1}(\Delta t)$ и $L_{x2}(\Delta t)$

определяются путем последовательного применения одномерной схемы к членам с производными по x_1 и x_2 в уравнении (48). Расщепленная система уравнений имеет вид:

в направлении оси x_1 :

$$\frac{\partial z_{\infty}}{\partial t} + \frac{1}{1-\varepsilon} \cdot \frac{\partial q_{x1}}{\partial x_1} = 0 \quad (51)$$

в направлении оси x_2 :

$$\frac{\partial z_{\infty}}{\partial t} + \frac{1}{1-\varepsilon} \cdot \frac{\partial q_{x2}}{\partial x_2} = 0. \quad (52)$$

Сокращенная запись предлагаемой схемы имеет вид:

$$(z_{\infty})_{i,j}^{n+1} = L_{x1}(\Delta t) L_{x2}(\Delta t) \cdot (z_{\infty})_{i,j}^n. \quad (53)$$

Такая конечно-разностная схема имеет второй порядок точности по пространственным переменным и времени. Каждый из операторов L_{x1} и L_{x2} схемы (53) представляет собой последовательность предиктор-корректор, т.е. является одномерным вариантом схемы по соответствующей пространственной координате.

При расчете деформаций необходимо учитывать различные причины их возникновения для русловых и пойменных участков. Размыв русла происходит из-за нарушения баланса наносов, описываемого уравнением (47), размыв же пойменных участков происходит при превышении неразмывающей скорости. Поэтому, глубину потока на пойме после размыва можно определить по формуле;

$$h_{пр} = \frac{h_{п} \cdot \sqrt{U_1^2 + U_2^2}}{U_{п}}. \quad (54)$$

Расчет деформаций (общего размыва) русла и пойменных участков ведется в следующей последовательности:

1. На n -м временном слое гидрографа паводка рассчитываем план течений реки без учета вторичных течений поперечной циркуляции и нормальных турбулентных напряжений.

2. Рассчитываем вторичные течения поперечной циркуляции.

3. Рассчитываем план течений реки с учетом эффекта вторичных течений поперечной циркуляции и нормальных турбулентных напряжений и производим расчет деформаций русла на данном временном слое.

3.1. При реализации вторых конечно-разностных операторов L_{x1} и L_{x2} при решении плановой задачи гидравлики отрывных течений, вычисляем все характеристики движения русловых наносов и вычисляем отметки дна после размыва по схеме (53).

4. Переходим на следующий временной слой ($t_n + \Delta t$) с учетом деформаций русла на предыдущем временном слое.

П я т а я г л а в а посвящена экспериментальным

исследованиями и сопоставительной оценке разработанных методов решения нестационарной плановой задачи отрывных течений, вторичных течений поперечной циркуляции и плановых деформаций русел. Приведен пример расчета мостового перехода через р. Десна и отмечены практические аспекты применения предложенных методов в инженерной практике.

Отсутствие необходимых экспериментальных и натуральных данных по исследованию планов отрывных течений, вторичных течений поперечной циркуляции с переменной по модулю и знаку кривизны струй потока, а также плановых деформаций аллювиальных русел привело к необходимости проведения лабораторных исследований на неразмываемых и размываемых моделях мостовых переходов. Этот вид гидротехнических сооружений наиболее распространен в практике строительства сооружений через водотоки, а при проектировании мостовых переходов возникают те проблемы, которые и рассмотрены в рамках настоящих исследований.

С целью апробации и обоснования предложенных методов расчета нестационарной плановой задачи гидравлики отрывных течений, вторичных течений поперечной циркуляции и плановых деформаций русел были выполнены экспериментальные исследования на моделях.

Исходя из поставленной цели непосредственными задачами исследований являлись:

- изучение полей осредненных скоростей и уровня режима (плана течений) в зоне влияния сооружений мостового перехода;
- изучение поверхностных и донных траекторий с целью определения размеров рециркуляционных зон в нижнем и верхнем бьефах мостовых переходов;
- изучение закономерностей распределения вторичных течений поперечной циркуляции по длине и ширине потока при переменных модуле и знаке кривизны струй;
- изучение плановых деформаций русел и их влияние на скоростную структуру потока;
- сопоставление результатов теоретических и экспериментальных данных;
- калибровка моделирующей системы.

Для проведения исследований были построены неразмываемая и размываемая физические модели мостового перехода с различными типами струенаправляющих дамб и без таковых, на основании общей теории моделирования гидравлических явлений.

Моделирование осуществлялось с искажением вертикального масштаба. Степень искажения принята равной $\phi = 2,5$, что

укладывается в рекомендуемый диапазон степени искажения.

Для пересчета основных характеристик модельного потока в натуру применяются формулы, вытекающие из закона гравитационного подобия.

При моделировании размываемой модели применялся метод по отрыву частиц от дна. В практике лабораторного моделирования принимаются крупность и качество грунта, имеющегося в лаборатории, и масштаб плановых размеров модели. Удобством для работы является тот случай, если для модели применяется тот же песок, что и в натуре, т.е. $M_d = 1$; тогда степень искажения вертикального масштаба равна 3.16.

С учетом сказанного выше можно сделать вывод о том, что режимы течения на модели соответствовали квадратичной области сопротивлений, для которой возможно одновременное удовлетворение всех условий: геометрического, кинематического, равенства коэффициентов сопротивления, чисел Фруда, параметров кинетичности и критерия подвижности наносов.

Экспериментальные исследования выполнялись на русловой площадке УкрНИИГиМа. Общий вид модели показан на рис. 9, а общий вид экспериментальной установки - на рис. 10.

Поперечное сечение лотка имело форму прямоугольника с углубленной трапециевидальной русловой частью. Дно модельного русла и поймы было неразмываемым и размываемым. Для размываемой модели использовался среднезернистый песок $d_{ср} = 0.31$ мм. Для придания пойме усиленной шероховатости, в случае неразмываемой и размываемой моделей, ее поверхность посыпалась гравием размерами 2-3 мм.

При изучении кинематической структуры моделируемых потоков применялся 10-канальный измеритель, разработанный в УкрНИИГиМ на базе микровертушки. Направления векторов скоростей в различных точках потока измерялись с помощью специального приспособления.

Исследования проводились при числах Фруда от 0.0079 до 0.091, что соответствует равнинным рекам. Числа Рейнольдса изменялись от 13000 до 89000, что отвечало условию автомодельности. Для апробации методов расчета планов неустановившихся отрывных течений и плановых деформаций русла и поймы был смоделирован однопиковый гидрограф паводка для равнинных рек, в случае отсутствия наблюдений за ними. Модельный гидрограф паводка и определил состав проведения исследований, который приведен на рис. 11.

Для установления времени стабилизации общих деформаций было проведено пять предварительных опытов, на основании которых установлено время стабилизации размыва на модели 7 часов для

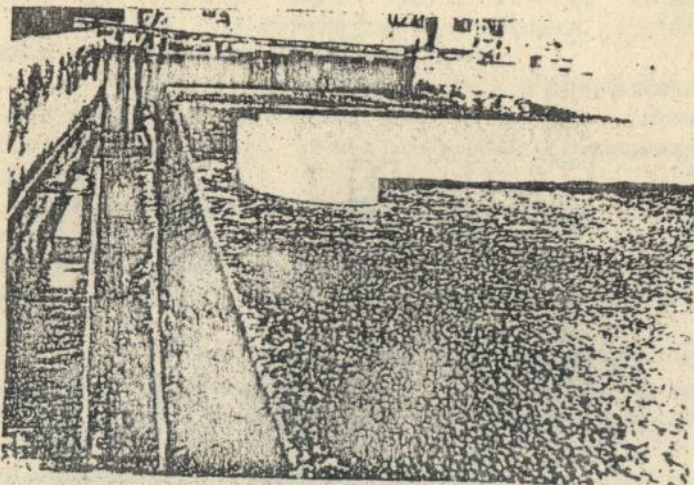


Рис. 9. Общий вид модели

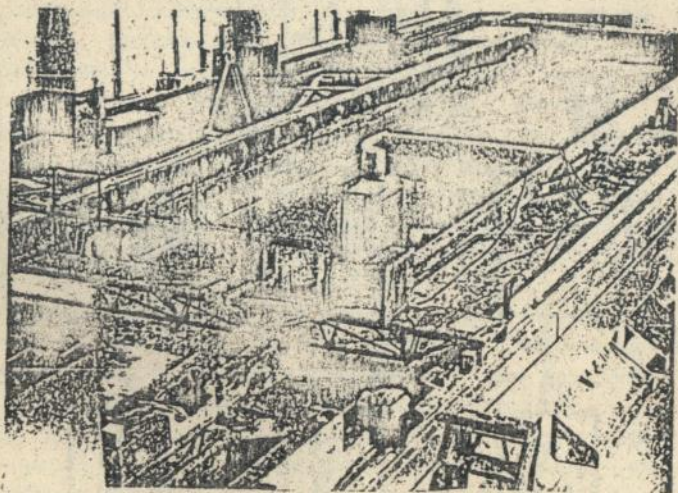


Рис. 10. Общий вид экспериментальной установки с моделью мостового перехода

данного грунта и масштабов моделирования.

В диссертационной работе произведена оценка точности выполненных измерений, на основании методов, предложенных Г.В. Железняковым, Б.Б. Данилевичем и А.Н. Зальцем. Относительная ошибка измерений величин не превышает 3.5%.

Для численной обработки результатов экспериментальных исследований был разработан пакет программ, позволяющих максимально расширить объем получаемой экспериментальной информации.

Графическая обработка результатов эксперимента проводилась с помощью графопостроителя СМ 7300 в комплексе с ЭВМ СМ 1420. Авторами было разработано три пакета программ для построения эпюр, профилей и графиков изменения характеристик потока по длине, ширине и его глубине.

Программное обеспечение реализации моделирующей системы, разработанное в рамках представленной работы, состоит из комплекса программ, включающего в себя восемь функционально независимых, но полностью согласованных между собой по структуре блоков, входных и выходных файлов.

В работе проведено сопоставление результатов расчетов планов нестационарных отрывных течений без учета эффекта поперечной циркуляции, планов стационарных отрывных течений методом установления, планов нестационарных отрывных течений с учетом эффекта поперечной циркуляции и нормальных турбулентных напряжений, а также плановых деформаций русел с данными экспериментов. Представленные в работе результаты показывают удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных данных. В качестве примера в автореферате приводятся: на рис. 12 - отрывные течения в зоне влияния мостового перехода - эпюры скоростей; на рис. 13 - переформирование одного вида циркуляции в другой; на рис. 14 - эпюры скоростей поперечной циркуляции.

В работе проведена калибровка моделирующей системы по вопросам установления показателя степени в степенном законе распределения скоростей по вертикали, численного значения коэффициента C_{μ} модели турбулентности для различных областей течения потока в зоне влияния мостового перехода.

С помощью разработанной системы моделирования применительно к гидравлическому обоснованию инженерных решений при проектировании мостовых переходов, был проведен детальный расчет проектируемого мостового перехода через р. Десна институтом УкрГИПРОДОР.

Расчеты планов течений и деформаций проводились путем

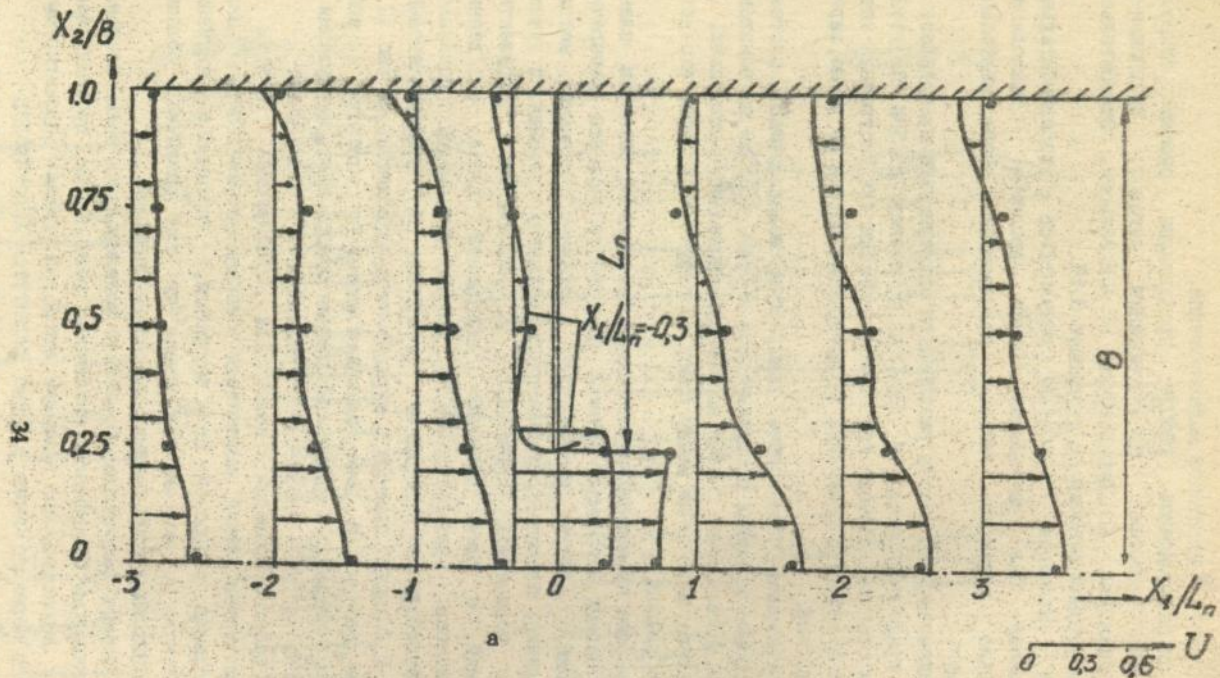


Рис. 12. Отрывные течения в зоне влияния мостового перехода - эпюры скоростей:
 — расчет; - эксперимент; а) - $Q = 0.170 \text{ м}^3/\text{с}$; модель №1,
 дамба пита I.

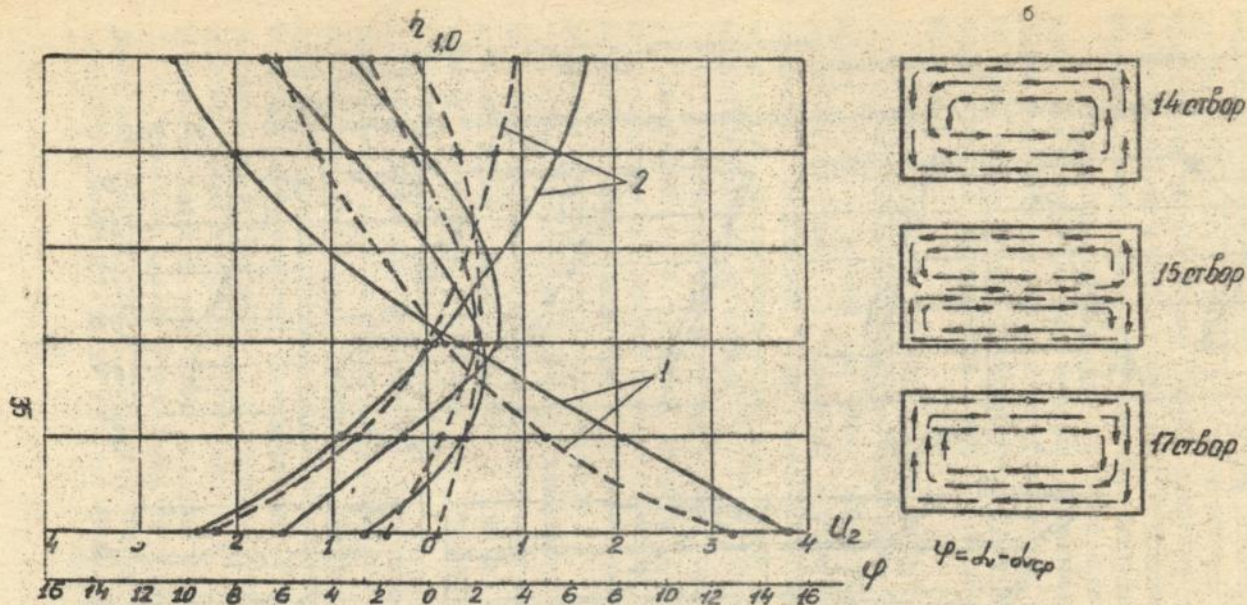
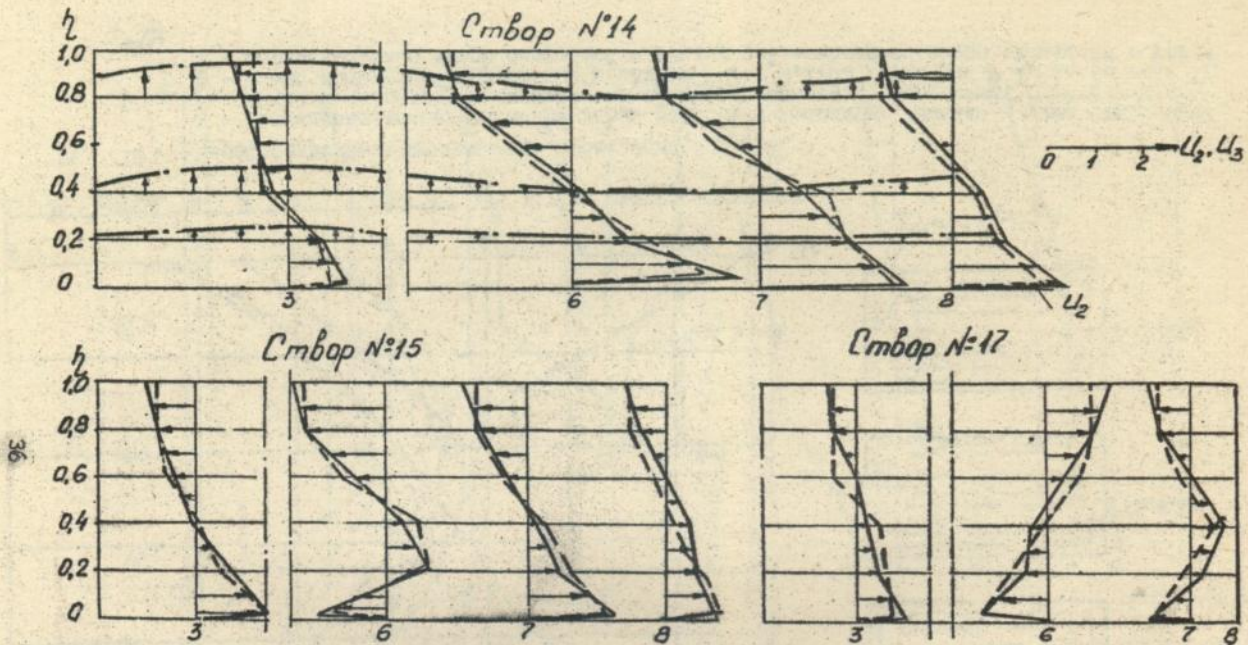


Рис. 13. Переформирование одного вида циркуляции в другой:

- а - последовательное изменение эпюры скоростей вторичных течений и угла отклонения вектора скорости от направления средней скорости на вертикали;
 б - схема поперечной циркуляции в опытах $Q = 0,170 \text{ м}^3/\text{с}$; модель № 1, дамба типа I/;
 1 - первоначальные эпюры скоростей и угла φ ; 2 - конечные эпюры скоростей и угла φ



36

Рис. 14. Эпюры скоростей вторичных течений поперечной циркуляции / u_2 / и вертикальной составляющей / u_3 /:
 — расчет ; - - - - расчет ; эксперимент / $Q=0,170\text{ м}^3/\text{с}$; модель №1 /;
 / цифрами указаны номера расчетные вертикалей /

совмещения метода установления и метода решения нестационарной плановой задачи. Полученные результаты расчета деформаций в определенных точках превышают результаты расчетов по нормативным документам (одномерная постановка) на 40-50%, что является весьма существенным при обосновании глубины заложения фундаментов опор моста. Проведенные расчеты подтверждают необходимость применения в проектной практике результатов настоящего исследования.

Таким образом, разработанная численная моделирующая система может рассматриваться как методика гидравлических и русловых расчетов мостовых переходов, позволяющая решать практически весь комплекс задач при их проектировании: компоновка сооружений перехода; глубина фундирования опор моста, укрепление насыпей подходов и дамб.

Основные результаты диссертационной работы:

1. Разработана математическая модель нестационарной плановой задачи отрывных течений без учета эффекта вторичных течений поперечной циркуляции и нормальных турбулентных напряжений в декартовых координатах. Для замыкания системы уравнений использована двухпараметрическая $k-\epsilon$ модель турбулентности, для величин осредненных по глубине.

2. Существенная роль вторичных течений поперечной циркуляции в формировании русла, переносе наносов, диффузионных задачах предопределила необходимость разработки математического описания механизма поперечной циркуляции с учетом стандартной трехмерной двухпараметрической модели турбулентности.

3. Предложенное математическое описание механизма поперечной циркуляции позволило получить математическую модель нестационарной плановой задачи отрывных течений с учетом эффекта вторичных течений поперечной циркуляции и нормальных турбулентных напряжений.

4. Вторичные течения поперечной циркуляции, неравномерность распределения скоростей и расходов по ширине потока обуславливают появление сосредоточенных размывов в руслах, которые являются причиной разрушения различных гидротехнических сооружений. С целью получения плановой картины деформации русел выведено двумерное уравнение баланса наносов, для замыкания которого применяется наиболее разработанная в теоретическом и прикладном аспектах методика Ван Райна расчета транспортирующей способности потока.

5. Применение метода установления, на основе явных конечно-разностных схем позволило предложить метод расчета вторичных течений поперечной циркуляции в руслах прямоугольного и произволь-

ного очертаний в плане с поперечными сечениями произвольной формы.

6. На основании анализа и обобщения численных методов решения нелинейных задач газогидродинамики разработаны методы расчета планов неустановившихся и установившихся отрывных течений, как с учетом, так и без учета эффекта вторичных течений поперечной циркуляции и нормальных турбулентных напряжений. Их основой являются: метод расщепления систем дифференциальных уравнений по пространственным переменным и времени, метод "предиктор-корректор" и метод установления.

7. Для реализации двумерного уравнения деформаций предложен оригинальный метод его решения.

8. Обширные экспериментальные исследования на русловой площадке по изучению динамических характеристик потока в зоне влияния мостовых переходов позволили провести калибровку разработанных математических моделей и сопоставление результатов расчетов с данными лабораторного эксперимента. Эти сравнения показали пригодность предлагаемых методов для решения прикладных инженерных задач.

9. Разработанные теоретические предпосылки, подтвержденные экспериментальными материалами, позволили предложить практические методы расчета планов течений и деформаций русел, которые были отработаны на конкретных мостовых переходах, показали их высокую эффективность и результативность, и внедрены в практику.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Применение уравнений планового движения для прогнозирования деформаций естественных русел. - В сб.: Гидравлика и гидротехника, Киев: Техніка, 1975, вып. 23, с. 57-60.

2. Сопоставительная оценка расчетных и натурных данных построения планов течения естественных русел. - В сб.: Гидравлика и гидротехника, Киев: Техніка, 1977, вып. 25, с. 39-44.

3. Учет оптимальной ширины русла при расчете отверстий мостов на реках с русловой многорукавностью. - Автомобильные дороги, 1978, №2, с. 37-40, (соавторы А. А. Курганович, С. Г. Ткачук).

4. Расчет размывов подмостовых русел с учетом плановой задачи. - Гидротехническое строительство, 1978, №6, с. 37-39.

5. Инженерные рекомендации по гидравлическим и русловым расчетам мостовых переходов на основе двумерной теории гидравлики (гидравлические расчеты). - Киев, 1980. - 21с. - Роталпринт Оргдортреста Миндортреста УССР.

6. Инженерные рекомендации по гидравлическим и русловым

расчетам мостовых переходов на основе двумерной теории гидравлики (русловые расчеты). - Киев, 1981. - 23с. - Ротапринт Оргдорстроя Миндорстроя УССР.

7. Характер изменения оптимальной ширины русел рек Карпат. - В сб.: Гидравлика и гидротехника, Киев: Техніка, 1981, вып.32, с.44-49, (соавторы А.А.Курганович, С.Г.Ткачук).

8. Методика учета деформаций свободной поверхности потока при расчете плана течений. - В сб.: Совершенствование методов гидравлических расчетов водопропускных и очистных сооружений. [Межвуз. научн. сб.]. Саратов. политехн. ин-т, 1983, с.24-29.

9. Исследование влияния формы живого сечения на величину коэффициента K , введенного в выражение касательных напряжений по дну, при решении плановой задачи гидравлики равномерных потоков. - В сб.: Совершенствование методов гидравлических расчетов водопропускных и очистных сооружений. [Межвуз. научн. сб.]. Саратов: Саратов. политехн. ин-т, 1984, с.57-62, (соавтор С.М.Гавриленко)

10. Плановая задача гидравлики мостовых переходов. - В кн.: Тез. докл. IV Республ. конф. по научно-техническим проблемам гидравлики дорожных водопропускных сооружений. Саратов: Изд-во Саратов. политехн. ин-та, 1985, с.28-32, (соавтор С.М.Гавриленко).

11. Формирование гидрографа стока при переменном по длине лога при боковом притоке. - В кн.: Тез. докл. IV Республ. конф. по научно-техническим проблемам гидравлики дорожных водопропускных сооружений. Саратов: Изд-во Саратов. политехн. ин-та, 1985, с.98-102, (соавтор С.М.Гавриленко).

12. Влияние бокового притока на распределение глубины в неустановившемся потоке. - В сб.: Гидравлика и гидротехника, Киев: Техніка, 1987, вып.44, с.14-18, (соавтор С.М.Гавриленко).

13. Проектирование водопропускных сооружений лоткового типа на автомобильных дорогах низких технических категорий. - В кн.: Тез. докл. научно-техн. конф. "Повышение качества строительства автомобильных дорог в Нечерноземной зоне РСФСР." Владимир: Владимир. политехн. ин-т, 1987, с.137-138, (соавтор Ю.В.Парахнюк).

14. О совершенствовании метода гидравлического расчета мостовых переходов на основе применения двумерных моделей течения с учетом поперечной циркуляции. - В кн.: Тез. докл. регион. научно-техн. кс ф. "Интенсификация строительства." Владимир: Владимир. политехн. ин-т, 1988, с.37-38, (соавтор В.В.Колесов).

15. О форме кривой сбросных расходов. - В сб.: Гидравлика и гидротехника, Киев: Техніка, 1989, вып.48, с.31-35.

16. Теоретические основы возникновения поперечной циркуляции

у струенаправляющей дамбы.- В сб.: Гидравлические исследования сооружений. Очистка жидкостей. [Межвуз. научн. сб.]. Саратов: Саратов. политехн. ин-т, 1989, с.23-27, (соавтор О.В.Товбич).

17. Об учете трехмерной кинематической структуры потока при решении плановой задачи гидравлики мостовых переходов.- В кн.: Тез. докл. научно-техн. конф. "Повышение эффективности использования водных ресурсов в сельском хозяйстве." Новочеркасск: Южгипроводхоз, 1989, с.169-170, (соавтор В.В.Колесов).

18. Устойчивость осредненных двумерных турбулентных потоков в верхнем и нижнем бьефах мостового перехода.- Р кн.: Тез. докл. научно-техн. конф. "Повышение эффективности использования водных ресурсов в сельском хозяйстве." Новочеркасск: Южгипроводхоз, 1989, с.167-168.

19. Гидродинамическое описание плана течений в зоне влияния гидротехнических сооружений.- Изв. вузов. Строительство и архитектура, 1990, №8, с.80-84.

20. Расчет плана течений в зоне влияния мостового перехода.- В сб.: Гидравлика и гидротехника, Киев: Техніка, 1991, вып.52, с.23-29.

21. Квазитрехмерная модель реального потока в зоне влияния мостового перехода.- В сб.: Гидравлика и гидротехника, Киев: Техніка, 1991, вып.52, с.29-34, (соавтор В.В.Колесов).

22. Математическая модель квазитрехмерного течения жидкости с учетом $k-\epsilon$ модели турбулентности.- Киев: 1992 - 47с.- Рукопись деп. в УкрИНТЭИ, N191 Деп, (соавтор Г.Н.Перечинская).

23. Решение плановой задачи нестационарных отрывных течений без учета эффекта поперечной циркуляции.- Киев: 1992.- 98с.- Рукопись деп. в УкрИНТЭИ, N192 Деп, (соавтор Г.Н.Перечинская).

24. Гидродинамическое описание вторичных течений поперечной циркуляции в зоне влияния мостовых переходов.- В сб.: Совершенствование гидравлических расчетов водопропускных и очистных сооружений. [Межвуз. научн. сб.]. Саратов: Саратов. политехн. ин-т, 1992, с.76-82.

25. Замыкание уравнений плановой задачи гидравлики.- В сб.: Гидравлика и гидротехника, Киев: Техніка, 1992, вып.55, с.9-14.

26. Экспериментальные исследования кинематической структуры потока на неразрываемой модели мостовых переходов.- В сб.: Гидравлика и гидротехника, Киев: Техніка, 1992, вып.55, с.19-25, (соавтор Г.Н.Перечинская).

Подписано в печать 01.12.93. Формат 60x84/16. Бумага типограф.
Офсетная печать. Усл.кр.-отт. II. Усл.печ.л. 2,32. Уч.-изд.л. 2,6.
Тираж 100 экз. Заказ № 260-I . Цена . Изд. № 249/Ш.

Издательство КИИГА

252058. Киев-58, проспект Космонавта Комарова, I.

100/106

AB 28.666