

Министерство высшего и среднего специального
образования Белорусской ССР

БЕЛОРУССКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

В.П. РОГУНОВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХМЕРНОГО ПОЛЯ ОСРЕДНЕННЫХ
СКОРОСТЕЙ В ОДНОРОДНЫХ ПО ДЛИНЕ ПОТОКАХ

(05.486 - Гидротехническое строительство и сооружения)

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Минск - 1971

Работа выполнена в Научно-исследовательском институте водных проблем Министерства мелиорации и водного хозяйства СССР.

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор
И.Л.РОЗОВСКИЙ

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор
С.Х.БУДЫКА
кандидат физико-математических наук, доцент
М.М.ЧЕПИНОГА

Ведущее предприятие - "Совгипромелиоводхоз"
Минводхоза СССР

Защита диссертации состоится 8 октября 1971 г. на заседании Объединенного Совета по присуждению ученых степеней по строительным, гидротехническим, строительству коммунальных сооружений и химико-технологическим специальностям при Белорусском ордена Трудового Красного Знамени политехническом институте.

Отзывы и замечания о работе (в 2-х экземплярах, заверенных печатью учреждения) просим направлять по адресу:

г. Минск-27, Ленинский проспект, 65, Белорусский политехнический институт, ученому секретарю Совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке БПИ.

Автореферат разослан 30 августа 1971 г.

Ученый секретарь Совета -
кандидат технических наук,
доцент

И.С.Качан

ВВЕДЕНИЕ

Рациональное проектирование гидротехнических сооружений является одним из основных источников повышения эффективности водохозяйственного строительства. Для такого проектирования необходимы знания сил взаимодействия потока с элементами сооружений, что требует решения сложных задач по динамике турбулентных течений. Решение многих вопросов все более интенсивного и комплексного использования водных ресурсов выдвигает аналогичное требование.

Исследованию этих задач уделялось и уделяется большое внимание и достигнуты значительные успехи. Тем не менее многие из них, имеющие широкую область приложений, не имеют до настоящего времени удовлетворяющего практику решения. К ним относятся, как правило, задачи о расчете трехмерного поля осредненных скоростей.

В работе рассматривается трехмерная задача о распределении осредненных скоростей в призматических каналах некруглого поперечного сечения при продольно-однородном движении. Для обозначения таких потоков используется предложенный О.Ф. Васильевым термин двупараметрический поток - поток, все характеристики которого зависят только от двух параметров (координат).

Исследования, посвященные задаче, выполнялись в течение продолжительного времени. Однако, в последнее время интерес к ее решению значительно возрос, так как выяснилось большое влияние поперечных компонентов осредненной скорости на различные процессы. На основании исследований многих авторов можно прийти к выводам о существенном влиянии поперечных компонентов скорости на устойчивость поперечных сечений некрепленных каналов и рек, так как они доставляют к откосам и дну массы осветленной воды из областей потока, где продольные скорости большие, значительно увеличивая местные касательные напряжения, создавая местный дефицит наносов и перераспределяя взвешенные наносы по вертикали, донные по периметру; гидравлические сопротивления и тепло- и массообмен (по многим оценкам на десятки процентов); перемешивание в потоках и т.д.

Известно влияние поперечных скоростей на погружение под поверхность максимума продольной скорости, водный транспорт, уменьшение нижнего критического числа Рейнольдса, интенсификацию биологических процессов в водотоках и т.д.

Таким образом, поперечные компоненты скорости, хотя и небольшие по абсолютному значению (по различным оценкам они могут достигать 5-10% от средней скорости), играют важную роль во многих процессах и придают новые качества различным явлениям.

Анализ опубликованных экспериментальных данных привел к выводу о том, что в настоящее время почти не имеется бесспорных экспериментальных доказательств существования трехмерного поля осредненных скоростей в двухпараметрических потоках, так как в опубликованных исследованиях, как правило, недостаточно уделялось внимания однородности по длине потоков. Анализ большинства опытов дает основание считать движение потока неоднородным по длине (неравномерным), где причины возникновения, величина и направление поперечных течений, как доказывается во многих работах, зависят от соотношения слагаемых уравнений движения, описывающих силы инерции и силы сопротивления. Поэтому необходимо было выполнить специальное экспериментальное исследование.

При теоретическом описании поля скоростей в качестве исходных были приняты уравнения Рейнольдса. С целью замыкания уравнений обычно для турбулентных напряжений или используются экспериментальные данные, или гипотезы о связи напряжений с осредненными скоростями. Однако, в данной задаче оказалось существенным не распределение касательных напряжений, связь которых с осредненными скоростями предложена Буссинеском, а распределение по сечению главным образом нормальных напряжений. Автору работы неизвестны гипотезы, кроме основанных на обобщениях немногочисленных экспериментальных данных, о связи нормальных напряжений с осредненными скоростями, которые позволяли бы решить трехмерную задачу о распределении скоростей в двухпараметрическом потоке. Поэтому одним из путей решения задачи было использование для связи турбулентных напряжений с осредненными скоростями предложенной обобщенной зависимости. При получении зависимости принята гипотеза о воздействии на большие пульсирующие объемы жидкости в потоке с градиентом осредненной скорости подъемных сил Н.Е. Жуковского, приемлемость применения которой обосновывается и подтверждается многочисленными сравнениями с экспериментальными данными. При этом оказалось, что нормальные компоненты тензора турбулентных напряжений связаны с касательными зависимостью, близкой к линейной. Использование обобщенной зависимости позво-

лило для исследования двухпараметрического потока получить систему уравнений движения, которая замыкается с помощью полуэмпирической формулы для продольных скоростей и решается приближенными методами.

Работа состоит из введения, пяти глав, выводов, изложенных на 227 страницах машинописного текста; 139 рисунков, 14 таблиц; списка литературы, включающей 233 наименования, из них 40 иностранных, а также приложений, в которых приведены основные сравнения расчетных величин с экспериментальными, расчетные распределения поперечных скоростей, кинематического коэффициента суммарной вязкости, программы для ЭВМ "Минск-22 М" решения задачи и др.

1. ОБЗОР И АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОСРЕДНЕННЫХ СКОРОСТЕЙ В ДВУПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ПОТОКАХ

Обзор и анализ исследований выполнен по следующим разделам: экспериментальные исследования, теоретические исследования потоков невязкой жидкости, вязкой жидкости и распределения по сечению только продольного компонента скорости в однородных по длине потоках. Очень кратко рассмотрено несколько работ, посвященных влиянию неоднородности по длине движения на распределение осредненных скоростей, что позволило критически оценивать результаты экспериментальных исследований.

Выполнен краткий анализ работ Н.С.Лалявского, А.И. Досиевского, И.С.Громека, А.А.Труфанова, В.Н.Гончарова, М.А.Великанова, О.Ф.Васильева, А.С.Офицера, Б.А.Фидмана, И.Л.Розовского, М.В.Потапова, Б.А.Пышкина, С.С.Бюшгенса, Н.И. Алексеева, И.О.Родионова, М.М.Дидковского, А.К.Ахундова, Н.П.Зрелова, М.И.Виноградова, О.С.Копыстьянского, И.П.Спицына, Ю.Д.Левченко, В.П.Бобкова, В.И.Субботина, М.Х.Ибрагимова, Г.И.Сабалева, И.А.Исупова, А.А.Машкилейсона, А.Н. Филатова, а также A.Gibson, L.Prandtl, I.Nikuradze, L.Howarth, H.Einstein, H.Li, I.Hinze, F.Gessner, H.Tracy, E.Brundrett, W.Baines, I.Liggett, Chao Lin Chiu, L.Miao, Ven Te Chow и др.

Наиболее распространенные взгляды на причины возникновения поперечных течений кратко представлены в таблице

№ п/п	Авторы	Объяснение причин возникновения поперечных течений
I.	A.Gibson	Потери на внутреннее трение понижают запас энергии, а значит и напор, и уровень у стенок. В результате чего уровень поверхности у оси выше, чем у стенок, и поэтому по оси возникает течение, направленное вниз, затем по дну к стенкам и у стенок вверх.
2.	L.Prandtl	Различная интенсивность пульсаций вдоль изотак и перпендикулярно к ним. Позже - неравенство касательных напряжений по периметру.
3.	L.Howarth	Турбулентное напряжение в том случае, если линии путей перемешивания $l = const$ не совпадают с линиями $u_i = const$.
4.	В.Н.Гончаров	Неравенство касательных напряжений по периметру. Позднее "принужденные" вихри.
5.	М.А.Великанов	Принужденные вихри и как результат их особая вихревая сила. В более поздних работах - отклонение давления от гидростатического закона.
6.	А.С.Офицеров	Вихри, всплывающие под воздействием силы Н.Е.Луковского в толщу потока.
7.	И.П.Спицын	Неравенство касательных напряжений по периметру, подъемные силы Н.Е.Луковского, воздействующие на всплывающие вихри.
8.	H.Einstein, H.Li	Турбулентные напряжения.
9.	E.Brundrett, W.Baines	Конвекция завихренности из районов рождения в районы диффузии.
10.	Chao Lin Chiu, L.Miao	Касательные напряжения вдоль градиентов первичной скорости.
11.	C.Ciray	В основном нормальные компоненты турбулентных напряжений.
12.	I.Hinze	Конвекция турбулентной энергии.
13.	Г.И. Сабелев, В.С.Петрищев, М.Х.Ибрагимов	В основном нормальные компоненты турбулентных напряжений.

Кратко рассмотрены работы В.А.Гавриленко, Н.Н.Павловского, В.Н.Гончарова, А.К.Ахундова, А.Г.Назаряна, Н.Н.Панова, Э.П.Коваленко, В.А.Александрова, М.Х.Ибрагимова, И.А.Исупова, Л.Л.Кобзарь, В.И.Субботина, А.И.Булеева, Г.П.Бирюковой, а также I.Replogle, Ven Te Chow и др., посвященные исследованию распределения по сечению только продольного компонента скорости.

Анализ выполненных исследований позволил сделать следующие выводы.

Большинство экспериментальных исследований ограничивалось измерениями только продольного компонента осредненной скорости. Количественных данных о распределении трех компонентов скорости очень мало, и относятся они в основном к закрытым потокам небольших размеров с гладкими стенками. Имеются многочисленные экспериментальные данные, на основании которых можно, судя по изгибам изоток, говорить о существовании осредненных поперечных скоростей. Однако, их изучение показывает, что измерения выполнялись в коротких установках и не контролировалась (да была и недостижима) однородность по длине потока.

Для невязкой жидкости в случае двупараметрического потока имеются решения трехмерной задачи, основанные на линеаризации уравнения движения.

Для потоков вязкой жидкости при турбулентном режиме движения существуют несколько предложений по расчету продольного компонента осредненной скорости. Все они носят гипотетический характер и являются приближенными. Имеющиеся предложения по расчету поперечных компонентов скорости в основном в закрытых потоках с гладкими стенками исходят только из обобщений немногочисленных экспериментальных данных.

Из анализа состояния исследований вытекает необходимость решения следующих задач:

1. Выполнить экспериментальное исследование двупараметрического потока, уделив основное внимание достижению однородности по длине и проверке существования поперечных компонентов осредненной скорости.

2. Разработать метод расчета трехмерного поля осредненных скоростей в двупараметрических потоках, пригодный в случае глад-

ких и шероховатых русел и во всех областях сопротивлений.

Поставленные задачи требовали прежде всего создания соответствующих измерительных приборов и экспериментальной установки.

П. ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Поскольку из-за значительных размеров экспериментальной установки существовала необходимость выполнения экспериментального исследования практически в полевых условиях, предъявлялись жесткие требования к надежности измерительных приборов. Поэтому для измерения продольного компонента скорости использовалась микровертушка, а для поперечного — фотоэлектрический угломер.

При разработке микровертушки был предложен для регистрации числа оборотов лопастного винта электролитический однополюсный способ формирования импульсов. Непосредственно к лопастному винту срезанным торцом подводится изолированный электрод. Торцев электрод должен подходить к лопасти винта, выполненного из диэлектрика, на расстояние долей миллиметра, но не соприкасаться с ней. Второй электрод заземляется. Проводимость участка электрической цепи электрод-земля зависит от расположения лопастей винта относительно электрода. Предельные положения лопасти относительно полюса изображены на рис. 1. В положении 1 лопасть находится далеко от полюса и не препятствует движению ионов непосредственно у полюса. В положении 2 ионы беспрепятственно двигаться не могут, а вынуждены ее обтекать, так как часть сечения непосредственно у полюса занята лопастью винта. Поэтому проводимость участка электрической цепи уменьшается. При вращении винта положения 1 и 2 последовательно сменяются и тем самым изменяется проводимость участка цепи электрод-земля. Таким образом формируется импульс тока, который усиливается и регистрируется счетчиком. Однополюсный способ формирования импульсов практически не создает дополнительного момента трения при регистрации числа оборотов лопастного винта и формирует значительный импульс тока. Благодаря этому существенно уменьшены размеры лопастного винта и нарушения потока датчиком, что позволяет использовать

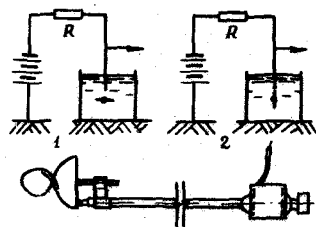


Рис. 1 Схема формирования импульсов и кинематическая схема датчика однополюсной микровертушки

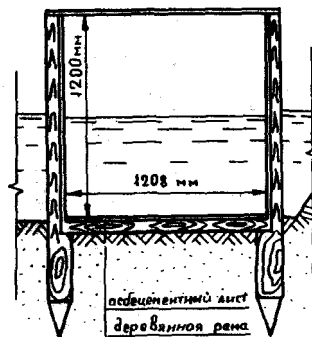


Рис. 2 Поперечное сечение экспериментальной установки

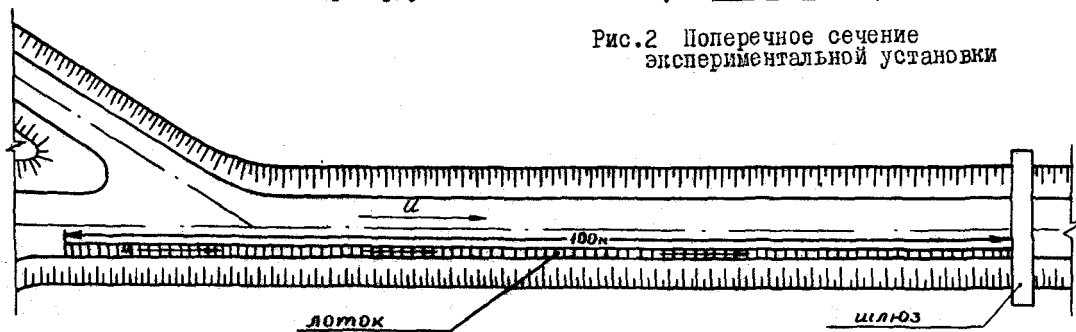


Рис. 3 План расположения экспериментальной установки

прибор при измерениях в потоках небольших размеров вблизи границ и уменьшает погрешности измерений; вес и момент инерции лопастного винта, что расширяет возможности прибора в области измерений турбулентных характеристик; силы трения, благодаря этому уменьшена начальная скорость трогания и получен линейный тарифовочный график во всем диапазоне измерений, последнее позволяет выбрать время осреднения таким, что величину скорости можно считывать непосредственно в см/сек со шкалы счетчика импульсов.

Для измерения осредненного направления вектора скорости в горизонтальной плоскости использовался фотоэлектрический угломер. Воспринимающий элемент угломера - плоская пластинка $0,1 \times 6 \times 20$ мм - может свободно вращаться на вертикальной оси под воздействием потока и устанавливается по направлению вектора скорости. На другом конце вертикальной оси так же жестко закреплен диск с неравномерной светопропускаемостью - световой клин. Диск размещен в светонепроницаемой камере между осветительными лампочками и фоторезисторами. Поэтому каждому положению флигера соответствует определенное положение светового клина и соответствующая ему освещенность фоторезисторов, включенных в схему моста. Предусмотрено автоматическое осреднение. Тарифовочный график в некотором диапазоне, зависящем от характеристик светового клина и фоторезисторов, линейный.

Таким образом, однопольная микровертушка позволяла измерять продольный компонент осредненной скорости, а фотоэлектрический угломер - направление осредненного вектора скорости в горизонтальной плоскости, и тем самым представлялась возможность непосредственным измерением устанавливать существование поперечных компонентов осредненной скорости и определять их величину.

III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОСРЕДНЕННЫХ СКОРОСТЕЙ

Исходя из существующих рекомендаций по длине входного участка и по соотношениям размеров датчиков к размерам сечения потока, обоснованы необходимые размеры установки. Экспериментальная установка, предназначенная для создания участка потока с однородным по длине движением, представляла собой призматический лоток раз-

мерами 100,0 x 1,2 x 1,2 м с постоянным уклоном 0,0003125 и была построена в одном из каналов у шлюза-регулятора. Расположение в плане и поперечное сечение установки представлены на рис. 2 и 3. Лоток эксплуатировался в затопленном состоянии, поэтому на него практически не воздействовала нагрузка и, следовательно, представлялось возможным изготовить его облегченной конструкции. Перед началом опытов были проведены испытания установки, позволившие сравнением полей продольных скоростей в различных по длине створах доказать, что в ней существует участок, на котором движение однородное по длине.

Основные измерения распределения по сечению продольного компонента осредненной скорости выполнены с помощью однополюсной микровертушки диаметром винта 4 мм, направления осредненного вектора скорости в горизонтальной плоскости - фотоэлектрическим угломером. Результаты измерений представлены в табличном виде для глубин $H_i = 0,600; 0,500; 0,400; 0,300; 0,250; 0,210; 0,171; 0,141$ м, а также в виде эпюр и полей изотак. Поперечные компоненты скорости для глубин $H_i = 0,500; 0,400; 0,300$ м представлены в табличном виде. Числа Рейнольдса изменялись в диапазоне $0,3+1,3 \cdot 10^5$. Продольные скорости измерялись в среднем в 100 точках в полусечении.

Непосредственным измерением направления вектора скорости с помощью фотоэлектрического угломера установлено, что в двухпараметрическом потоке несомненно существуют поперечные компоненты осредненной скорости, т.е. двухпараметрический поток - поток трехмерный. Существование поперечных компонентов скорости подтверждается также характерными изгибами изотак и погружением максимума скорости на вертикалях, расположенных у стенок. Поперечные течения охватывают значительную область потока и существуют у стенок при любых отношениях $\frac{B}{H}$. Поперечные течения к углу чаще всего не совпадают с биссектрисой, а сдвинуты примерно параллельно биссектрисе от угла вдоль большей стороны периметра. Поперечные скорости у поверхности направлены от стенок к середине сечения и примерно на расстоянии H сосредоточенно погружаются вглубь потока, образуя основной винт поперечного течения. Максимальные величины поперечных скоростей достигают 10% от средней скорости. Максимум продольной скорости находится на поверхности только в

средней части сечения у потоков с отношением $\frac{B}{H} > 2$. При уменьшении $\frac{B}{H}$ область с погруженным максимумом скорости приближается к середине потока, и при $\frac{B}{H} = 1$ максимум погружен под поверхность даже на средней вертикали. При увеличении отношения $\frac{B}{H}$ начинается довольно резкое погружение максимума на некотором расстоянии от средней вертикали и затем достигает наибольшей величины, примерно равной $\frac{H}{2}$, у боковых стенок.

IV. ИССЛЕДОВАНИЕ СВЯЗИ МЕЖДУ НОРМАЛЬНЫМИ КОМПОНЕНТАМИ ТЕНЗОРА НАПРЯЖЕНИЙ И ОСРЕДНЕННЫМИ СКОРОСТЯМИ

В настоящее время наиболее широкое распространение получила качественная схема развитой турбулентности, трактующая турбулентность как совокупность неоднородных возмущений, вихрей различных размеров, имеющих характерные масштабы и скорости. Пульсации наибольшего размера, определяемого интегральными масштабами длины, имеют характерную скорость, близкую к $\sqrt{u'^2}$. Характерные скорости мелкомасштабных пульсаций значительно меньше характерных скоростей крупномасштабных пульсаций. В области потока не слишком близкой к стенкам можно выделить часть пульсаций, статистический режим которых изотропный и по сечению однородный. Хотя совокупность мелкомасштабных возмущений также в некоторой мере неаизотропна и по сечению неоднородна, естественно все же связывать выделенную часть в основном с мелкомасштабными пульсациями.

В потоке с градиентом осредненной скорости имеются необходимые и достаточные условия для возникновения подъемных сил Н.Е. Жуковского, так как существуют относительное движение пульсирующих объемов жидкости и циркуляция скорости. На этом основании принимается следующая гипотеза: в потоке с градиентом осредненной скорости на большие пульсирующие объемы жидкости воздействует подъемная сила Н.Е. Жуковского.

Гипотеза о возникновении в потоке подъемных сил в различных формах неоднократно высказывалась в работах: А.А. Саткина, М.А. Великанова, А.Я. Миловича, А.С. Офицера, Ф.Я. Фабриканта, др. К выводу о возникновении подъемных сил можно прийти также

из рассмотрения уравнений баланса для средних плотностей турбулентной энергии в направлении отдельных координатных осей.

В диссертации обосновывается возможность приближенного определения подъемных сил, воздействующих на большие пульсирующие объемы жидкости, в случае вихревого движения и пространственного обтекания по формуле

$$\vec{F} = \rho \vec{u}' \times \iint_{(S)} \vec{n} \times \vec{u} \, ds, \quad \text{где}$$

u' - относительная скорость натекания на пульсирующий объем потока, $\iint_{(S)} \vec{n} \times \vec{u} \, ds$ - поверхностный интеграл векторной циркуляции скорости по поверхности пульсирующего объема.

При определении осредненного напряжения, вызываемого подъемной силой, в качестве меры относительного движения естественно принять вектор с компонентами, равными среднеквадратичным значениям пульсационных скоростей, а интеграл в этом случае будет поверхностным интегралом векторной циркуляции осредненной скорости по поверхности пульсирующего объема.

Используя формулу Остроградского - Гаусса, интегрируя по пульсирующему объему и учитывая, что кинематический коэффициент турбулентной вязкости $K_t = \sqrt{\overline{u'^2}} \cdot L_H(0, x_2, 0)$, получим для осредненного напряжения, вызываемого подъемной силой, в случае плоского однородного по длине потока

$$\rho b_{11} = \rho l_{12} K_t \frac{\partial u_1}{\partial x_2},$$

$$\rho b_{22} = \rho a_{12} K_t \frac{\partial u_1}{\partial x_2},$$

$$\rho b_{33} = \rho a_{32} a_{12} K_t \frac{\partial u_1}{\partial x_2}, \quad \text{где}$$

$$l_{12} = \frac{L_{22}(x_1, 0, 0)}{L_H(0, x_2, 0)}, a_{12} = \frac{\sqrt{\overline{u_1'^2}}}{\sqrt{\overline{u_2'^2}}}, a_{13} = \frac{\sqrt{\overline{u_1'^2}}}{\sqrt{\overline{u_3'^2}}}, a_{32} = \frac{\overline{u_3'^2}}{\overline{u_2'^2}},$$

u_1 - продольный компонент осредненной скорости.

Учитывая напряжения, вызванные мелкомасштабными пульсациями ρb_{00} , получим:

$$\begin{aligned}\rho \overline{u'_1 u'_1} &= \rho l_{12} K_1 \frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \rho b_{00}, \\ \rho \overline{u'_2 u'_2} &= \rho a_{12} K_1 \frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \rho b_{00}, \\ \rho \overline{u'_3 u'_3} &= \rho a_{32} a_{12} K_1 \frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \rho b_{00}.\end{aligned}$$

Отношения a_{12} , a_{32} , как показывают обобщения, выполненные для потоков с гладкими стенками В.П.Бобковым, М.Х. Ибрагимовым, М.Х. Сабелевым, зависят только от относительных координат и изменяются в довольно узких пределах $1 \leq a_{12}, a_{32} \leq 2.4$ (при приближенных расчетах их можно принять даже постоянными). Тогда, используя гипотезу Буссинеска, перепишем

$$\begin{aligned}\rho \overline{u'_1 u'_1} &= -\rho l_{12} \overline{u'_1 u'_2} + \rho b_{00}, \\ \rho \overline{u'_2 u'_2} &= -\rho a_{12} \overline{u'_1 u'_2} + \rho b_{00}, \\ \rho \overline{u'_3 u'_3} &= -\rho a_{32} a_{12} \overline{u'_1 u'_2} + \rho b_{00}.\end{aligned}$$

Таким образом, получена близкая к линейной зависимость между нормальными касательными напряжениями.

Аналогично, пренебрегая производными от поперечных компонентов осредненной скорости перед продольными, для двухпараметрического потока в треугольных областях, прилегающих к границам, находим

$$\begin{aligned}\rho \overline{u'_1 u'_1} &= \rho l_{12} K_1 \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_1}{\partial x_3} \right) + \rho b_{00}, \\ \rho \overline{u'_2 u'_2} &= \rho a_{12} K_1 \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_2} + a_{32} \frac{\partial u_1}{\partial x_3} \right) + \rho b_{00}, \\ \rho \overline{u'_3 u'_3} &= \rho a_{12} K_1 \left(a_{32} \frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_1}{\partial x_3} \right) + \rho b_{00}.\end{aligned}$$

Тогда гипотезу о связи тензора турбулентных напряжений с осредненными скоростями можно записать (но i не суммируется!)

$$\rho \overline{u_i' u_j'} = \rho (b_{ii} + b_{00}) \delta_{ij} - \rho K_1 \Phi_{ij} \quad , \text{ где}$$

Φ_{ij} - тензор скоростей деформации.

Полученная зависимость более общая, поскольку при $b_{ii} = \text{const}$ имеем постоянное значение первого слагаемого как в обычно используемых гипотезах.

Расчеты по этим формулам сравнивались с многими экспериментами как для плоского, так и двухпараметрического потоков. Всего выполнено 22 сравнения с опытами: И.К.Никитина (12 опытов), Е.М.Минского (1 опыт), Лауфера (1), Ж.Конт-Белло (6), Е. Brundrett , W.Baines (1), Н.Трасу (1). Сравнение расчетных данных с экспериментальными выполнялось по упрощенному способу: для отношений l_{12} , a_{12} , a_{32} принимались на основании обобщений экспериментальных данных средние значения $l_{12} = 4,0$; $a_{12} = 1,45$; $a_{23} = 1,45$. Тогда, пренебрегая влиянием на нормальные напряжения поперечных течений, расчетные формулы можно переписать в виде

$$\overline{u_1' u_1'} = -4,0 (\overline{u_1' u_2'} + \overline{u_1' u_3'}) + b_{00} \quad ,$$

$$\overline{u_2' u_2'} = -1,45 (\overline{u_1' u_2'} + 1,45 \overline{u_1' u_3'}) + b_{00} \quad ,$$

$$\overline{u_3' u_3'} = -1,45 (1,45 \overline{u_1' u_2'} + \overline{u_1' u_3'}) + b_{00} \quad .$$

Значения $\overline{u_1' u_2'}$, $\overline{u_1' u_3'}$ обычно приводятся в экспериментальных данных. Значение b_{00} определялось в одной точке у поверхности потока и далее считалось постоянным на вертикали или в сечении.

В качестве примера на рис. 4 представлено сравнение расчетов по полученным формулам с опытами И.К.Никитина. На рис. приведены значения $\overline{u_i' u_j'} | i \neq j$, принимаемые при расчете и вычисленные $\sqrt{\overline{u_i' u_i'}}$ и b_{00} . Отметим, что можно было бы достичь

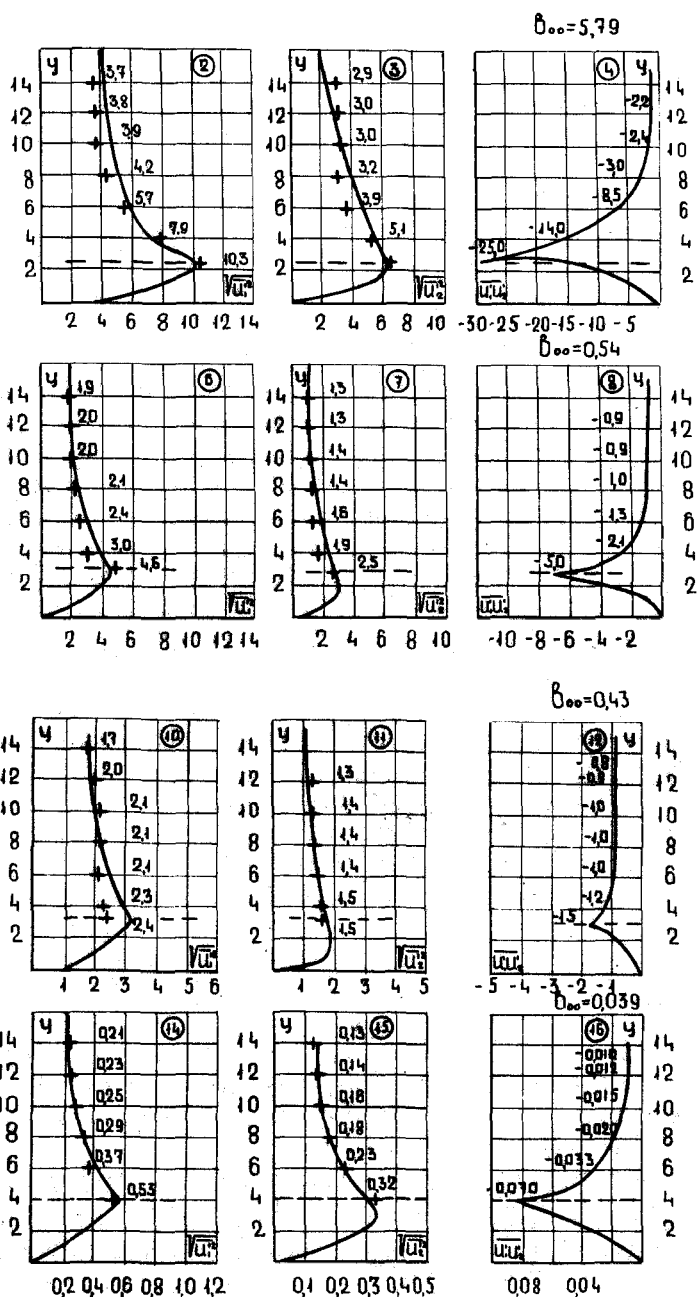


Рис. 4 Сравнение расчетных $\sqrt{U_1}, \sqrt{U_2}$ с экспериментальными данными И.К.Никитина

лучшего согласования с опытными данными, если бы принять в расчете не средние значения l_{12} , α_{12} , α_{32} , а изменяющиеся по сечению. Однако, по-видимому, и без уточнения можно говорить об удовлетворительном согласовании расчетных данных с экспериментальными.

Таким образом, установлена зависимость нормальных компонентов турбулентных напряжений от осредненных скоростей, которая позволила представить в более общем виде гипотезу о связи турбулентных напряжений с осредненными скоростями. Поскольку результаты расчетов удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными, это дает основания использовать обобщенную формулу для тензора турбулентных напряжений при замыкании системы уравнений.

У. РЕШЕНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ ЗАДАЧИ О РАСПРЕДЕЛЕНИИ ОСРЕДНЕННЫХ СКОРОСТЕЙ В ДВУПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ПОТОКАХ

Запишем уравнения Рейнольдса применительно к двупараметрическому потоку

$$\left\{ \begin{aligned} u_3 \frac{\partial u_3}{\partial x_3} + u_2 \frac{\partial u_3}{\partial x_2} &= F_3 - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_3} + \nu \Delta u_3 + \frac{\partial}{\partial x_3} (-\overline{u_3'^2}) + \frac{\partial}{\partial x_2} (-\overline{u_3' u_2'}) , \\ u_3 \frac{\partial u_2}{\partial x_3} + u_2 \frac{\partial u_2}{\partial x_3} &= F_2 - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_2} + \nu \Delta u_2 + \frac{\partial}{\partial x_3} (-\overline{u_3' u_2'}) + \frac{\partial}{\partial x_2} (-\overline{u_2'^2}) , \\ u_3 \frac{\partial u_1}{\partial x_3} + u_2 \frac{\partial u_1}{\partial x_2} &= F_1 + \nu \Delta u_1 + \frac{\partial}{\partial x_3} (-\overline{u_3' u_1'}) + \frac{\partial}{\partial x_2} (-\overline{u_2' u_1'}) . \end{aligned} \right.$$

Ось x_1 направлена вдоль потока, x_2 - вверх, перпендикулярно дну.

Проекция уравнения вдоль поперечных осей x_1 и x_2 продифференцируем, соответственно, по x_2 и x_3 и вычтем одно из другого. Введем функцию тока для поперечной циркуляции

$$u_3 = \frac{\partial \psi}{\partial x_2} , \quad u_2 = - \frac{\partial \psi}{\partial x_3} .$$

В результате приходим к системе

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial \psi}{\partial x_2} \cdot \frac{\partial}{\partial x_3} \Delta \psi - \frac{\partial \psi}{\partial x_3} \cdot \frac{\partial}{\partial x_2} \Delta \psi &= \nu \Delta^2 \psi + \frac{\partial^2}{\partial x_2 \partial x_3} (-\overline{u_3'^2}) - \\ &- \frac{\partial^2}{\partial x_3 \partial x_2} (-\overline{u_2'^2}) + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} (-\overline{u_3' u_2'}) - \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} (-\overline{u_3' u_2'}) , \\ \frac{\partial \psi}{\partial x_2} \cdot \frac{\partial u_i}{\partial x_3} - \frac{\partial \psi}{\partial x_3} \cdot \frac{\partial u_i}{\partial x_2} &= F_i + \nu \Delta u_i + \frac{\partial}{\partial x_3} (-\overline{u_3' u_i'}) + \frac{\partial}{\partial x_2} (-\overline{u_2' u_i'}) . \end{aligned} \right.$$

Первое уравнение системы несколько другим путем было получено ранее (1958 г.) Н. Einstein и Н. Li . Интересно отметить, что из него следует зависимость поперечных компонентов скорости только от турбулентных напряжений.

Преобразуем систему уравнений, используя обобщенную зависимость для тензора турбулентных напряжений. На основании физических соображений о близком к линейному медленному изменению кинематического коэффициента турбулентной вязкости в предположении одинакового порядка вторых и четвертых производных от ψ приходим к выводу о возможности использования при упрощениях оценки

$$\frac{\partial^2 K_i}{\partial x_i \partial x_j} \cdot \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_i \partial x_j} \ll (K_i + \nu) \frac{\partial^4 \psi}{\partial x_i^4} ,$$

поскольку вторая производная от линейной функции равна нулю:

В результате приходим к следующей системе уравнений движения для двухпараметрических потоков

$$\left\{ \begin{aligned} (K_i + \nu) \Delta^2 \psi + \left(2 \frac{\partial K_i}{\partial x_3} - \frac{\partial \psi}{\partial x_2} \right) \frac{\partial}{\partial x_3} \Delta \psi + \left(2 \frac{\partial K_i}{\partial x_2} + \frac{\partial \psi}{\partial x_3} \right) \frac{\partial}{\partial x_2} \Delta \psi &= \frac{\partial^2}{\partial x_2 \partial x_3} (b_{33} - b_{22}) , \\ (K_i + \nu) \Delta u_i + \left(\frac{\partial K_i}{\partial x_3} - \frac{\partial \psi}{\partial x_2} \right) \frac{\partial}{\partial x_3} u_i + \left(\frac{\partial K_i}{\partial x_2} + \frac{\partial \psi}{\partial x_3} \right) \frac{\partial}{\partial x_2} u_i &= -F_i . \end{aligned} \right.$$

Полученная система, несмотря на то, что b_{33} и b_{22} выражаются через уже входящие в систему неизвестные, не замкнута, так как неизвестными остаются ψ , K_i , u_i . Обычно в таких случаях пытаются замкнуть систему посредством гипотезы о распределении K_i . Так поступают в аналогичных случаях В.М. Маккавеев ($K = c u_i$),

А.Г.Назарян ($K = c u_*^2$) и др. Однако, распределение K , экспериментально слабо изучено, поэтому высказать удовлетворительную гипотезу о распределении кинематического коэффициента турбулентной вязкости по сечению не представляется возможным. По распределению продольных скоростей по сечению накоплен богатый экспериментальный материал. Поэтому нам представляется более плодотворным следующий путь решения задачи: рассчитать в первом приближении распределение по сечению продольных скоростей на основе одной из полуэмпирических зависимостей, сравнить рассчитанное распределение с максимально возможным количеством экспериментальных данных, и, в случае удовлетворительного согласования, использовать ее для замыкания системы.

Вывод формулы для распределения в первом приближении продольных скоростей выполнен применительно к прямоугольному сечению и основан на гидравлической аксиоме, широко используемой при определении средней скорости: каждый равномерный поток равнозначен плоскому равномерному с глубиной, равной гидравлическому радиусу и шириной, равной смоченному периметру. Э.П. Коваленко показал, что а) упомянутую аксиому можно сформулировать следующим образом: каждый равномерный поток равнозначен сумме двух плоских потоков вертикального плоского с глубиной, равной H и шириной B и горизонтального плоского с глубиной, равной B и шириной, равной H ; б) на основании последней формулировки можно рассчитать распределение продольных скоростей в сечении.

При выводе формулы использовались упомянутая аксиома в трактовке Э.П.Коваленко и полученные И.К.Никитиным зависимости для распределения скоростей и для определения гидравлических сопротивлений в плоских потоках. Полученная формула имеет вид:

$$u_1 = u_{cp} + N \left(\ln \frac{ex_2}{H} - \frac{\delta_2}{x_2} \right) + \rho \left(\ln \frac{ex_3}{B} - \frac{\delta_3}{x_3} \right),$$

где $\delta_3 \leq x_3 \leq B$, $\delta_2 \leq x_2 \leq H$

Начало координат находится в точке пересечения дна и стенки потока, B - полуширина сечения.

Параметры N и ρ имеют смысл весовых функций влияния на местную осредненную скорость, соответственно, дна и стенок потока и определяются по формулам

$$N = 2,98 \cdot \frac{R^{\frac{3}{2}} \left(F + l g \frac{R}{\delta} \right)}{H^{\frac{3}{2}} \left(F + l g \frac{H}{\delta_2} \right)} \cdot u_{*2}; P = 2,98 \cdot \frac{R^{\frac{3}{2}} \left(F + l g \frac{R}{\delta} \right)}{B^{\frac{3}{2}} \left(F + l g \frac{B}{\delta_3} \right)} \cdot u_{*3},$$

где $F = 1,69$ для области с полным проявлением шероховатости, $F = 2,13$ - для переходной области. Толщина пристенного слоя δ_i определяется для каждого плоского потока в соответствии с методикой И.К.Никитина.

В качестве примера на рис. 5 представлены экспериментальное и расчетное распределения продольных скоростей для одного из опытов автора, приведены все исходные данные и расчетные параметры полученной формулы. Совпадение расчетных и экспериментальных данных, особенно у дна, можно признать удовлетворительным. Однако, обращает на себя внимание факт отклонения расчетных скоростей от экспериментальных данных вблизи стенок и особенно у свободной поверхности, у стенок. Эти отклонения можно объяснить существованием в потоке поперечных течений, которые не учитываются формулой.

На основании выполненных сравнений (всего 47 с опытами Базена, Назаряна, автора) можно прийти к выводу о возможности использования полученной формулы для замыкания в первом приближении системы уравнений. Тогда из второго уравнения системы, пренебрегая влиянием поперечных течений на турбулентную вязкость (возможность пренебрежения обосновывается), можно получить распределение в сечении кинематического коэффициента суммарной вязкости. В этом случае второе уравнение системы будет иметь вид

$$K \Delta u_1 + \frac{\partial K}{\partial x_2} \cdot \frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial K}{\partial x_3} \cdot \frac{\partial u_1}{\partial x_3} + F_1 = 0,$$

где K - кинематический коэффициент суммарной вязкости.

Относительно $K = K_1 + \gamma$ - это линейное неоднородное уравнение в частных производных первого порядка. Для его интегрирования необходимы начальные данные Коши, которыми может быть распределение K на одной из вертикалей. Чтобы найти распределение кинематического коэффициента суммарной вязкости на средней вертикали, решена следующая задача Коши для уравнения, записанного применительно к средней вертикали.

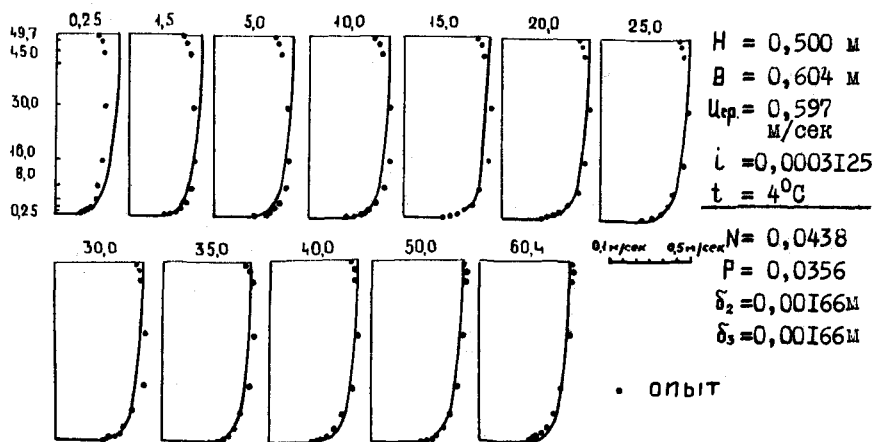


Рис.5 Сравнение расчетов по формуле распределения продольных скоростей первого приближения с экспериментальными данными автора

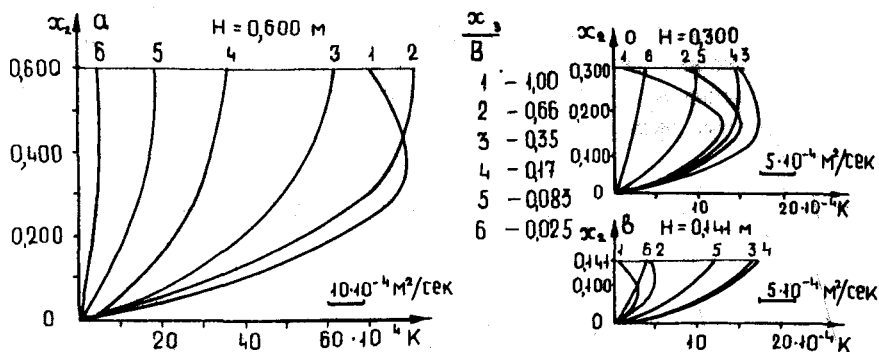


Рис. 6 Расчетное распределение по сечению кинематического коэффициента суммарной вязкости при различных отношениях B/H .

Найти решение обыкновенного дифференциального уравнения

$$N \left(\frac{1}{x_2} + \frac{\delta_2}{x_2^2} \right) \frac{dK}{dx_2} - \left[N \left(\frac{1}{x_2^2} + \frac{2\delta_2}{x_2^3} \right) + \rho \left(\frac{1}{B^2} + \frac{2\delta_3}{B^3} \right) \right] K = -F_1,$$

такое, чтобы при $x_2 = \delta_2$, $K = K_{\delta_2}$.

K_{δ_2} определяется по формуле И.К.Никитина для границы пристенного слоя

$$K_{\delta_2} = \frac{u_{*2}^2}{\frac{\partial u_1}{\partial x_2} \big|_{x_2 = \delta_2}}.$$

Решение

$$K = \frac{F_1}{N} \cdot \frac{x_2^2}{x_2 + \delta_2} \cdot e^{G_2(x_2 - \delta_2)^2} \left[H - (x_2 - \delta_2) + \frac{G_2}{3} (x_2 - \delta_2)^3 \right],$$

где

$$G_2 = \frac{\rho}{2N} \left(\frac{1}{B^2} + \frac{2\delta_3}{B^3} \right).$$

Таким образом, для расчета распределения по сечению кинематической суммарной вязкости приходим к следующей задаче Коши.

Найти решение линейного дифференциального уравнения в частных производных первого порядка

$$N \left(\frac{1}{x_2} + \frac{\delta_2}{x_2^2} \right) \frac{\partial K}{\partial x_2} + \rho \left(\frac{1}{x_3} + \frac{\delta_3}{x_3^2} \right) \frac{\partial K}{\partial x_3} - \left[N \left(\frac{1}{x_2^2} + \frac{2\delta_2}{x_2^3} \right) + \rho \left(\frac{1}{x_3^2} + \frac{2\delta_3}{x_3^3} \right) \right] K = -F_1,$$

такое, чтобы

$$K = \frac{F_1}{N} \cdot \frac{x_2^2}{x_2 + \delta_2} \cdot e^{G_2(x_2 - \delta_2)^2} \left[H - (x_2 - \delta_2) + \frac{G_2}{3} (x_2 - \delta_2)^3 \right]$$

при $x_3 = B$.

Задача решается известными методами. Интегралы не всегда выражаются в элементарных функциях, поэтому приходится прибегать к разложению в ряды, которые быстро сходятся. Погрешности замены функций конечным числом членов ряда оцениваются.

Решение имеет вид

$$K = \frac{F_1}{\sqrt{pN}} \cdot \frac{x_2^2}{x_2 + \delta_2} \cdot \frac{x_3^2}{x_3 + \delta_3} \left\{ \ln \frac{B - \delta_3 + \sqrt{(\quad)}}{(x_3 - \delta_3) + \sqrt{\frac{p}{N}(x_2 - \delta_2) + \alpha}} + \right. \\ \left. + \frac{B + \delta_3}{\beta^2} \cdot e^{\alpha(\quad)} \left[H \sqrt{\frac{p}{N}} - \sqrt{(\quad)} + \frac{G}{3} \sqrt{(\quad)} \right] \right\},$$

где $(\quad)$ - обозначение, $(\quad) = (B - \delta_3)^2 - (x_3 - \delta_3)^2 + \frac{p}{N}(x_2 - \delta_2)^2$; $G = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\beta^2} + \frac{2\delta_3}{\beta^3} \right)$, α - очень малая величина ($\alpha \ll \delta_i$), служащая для исправления решения только в окрестности $x_2 = \delta_2$, $x_3 = \delta_3$.

В работе рассчитано распределение K для 8 опытов автора, чтобы показать особенности распределения K по сечению при различных $\frac{B}{H}$, на рис. 6 приводятся расчетное распределение K для трех опытов. Из рис. видно, что K у границ увеличивается почти по линейному закону. Затем изменение зависит от отношения $\frac{B}{H}$ и от расстояния вертикали от стенки: для областей у середины потока при больших отношениях $\frac{B}{H}$ кинематический коэффициент суммарной вязкости имеет максимум в области, близкой $\frac{H}{2}$, и при приближении к поверхности уменьшается почти до 0; при малых отношениях $\frac{B}{H}$ максимум расположен выше $\frac{H}{2}$ и при приближении к поверхности K лишь несколько уменьшается. Для вертикалей, расположенных вблизи стенок, K увеличивается всегда почти линейно, достигая максимума у поверхности.

В диссертации приводится качественное сравнение расчетных распределений K с опытами Е.М.Минского, А.В.Хараушева, Govindo Rao, расчетами Н.И.Булеева и Г.П.Бирюковой и др. Расчетные значения кинематического коэффициента суммарной вязкости по полученной формуле находят подтверждение как с качественной, так и с количественной стороны. Однако, надо отметить ограниченный объем количественных сравнений с экспериментальными данными.

Формула для расчета распределения по сечению кинематической суммарной вязкости позволяет замкнуть первое уравнение системы. Для расчета поперечных компонентов скорости получено квазилинейное дифференциальное уравнение в частных производных четвертого порядка.

$$K \Delta^2 \psi + \left(2 \frac{\partial K}{\partial x_3} - \frac{\partial \psi}{\partial x_2} \right) \frac{\partial}{\partial x_3} \Delta \psi + \left(2 \frac{\partial K}{\partial x_2} + \frac{\partial \psi}{\partial x_3} \right) \frac{\partial}{\partial x_2} \Delta \psi = \frac{\partial^2}{\partial x_2 \partial x_3} a_1 K \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_2} - \frac{\partial u_1}{\partial x_3} \right),$$

где $a_1 = a_{12} (a_{32} - 1)$.

Естественно попытаться при решении уравнения в первом приближении пренебречь производными первого порядка $\frac{\partial \psi}{\partial x_i}$, исходя из следующих соображений. Из исходных уравнений можно сделать вывод, что, пренебрегая $\frac{\partial \psi}{\partial x_i}$, не учитываем инерции осредненного поперечного движения, которая сама по себе не может ни создавать, ни уничтожать поперечных течений. Поэтому можно ожидать, что пренебрежение слагаемыми $\frac{\partial \psi}{\partial x_2}$, $\frac{\partial \psi}{\partial x_3}$ при выполнении первого приближения несущественно скажется на решении уравнения. Тогда уравнение перепишется в виде

$$\Delta^2 \psi + \frac{2}{K} \frac{\partial K}{\partial x_2} \frac{\partial}{\partial x_2} \Delta \psi + \frac{2}{K} \frac{\partial K}{\partial x_3} \frac{\partial}{\partial x_3} \Delta \psi = \frac{1}{K} \frac{\partial^2}{\partial x_2 \partial x_3} a_1 K \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_2} - \frac{\partial u_1}{\partial x_3} \right).$$

Таким образом, для расчета в первом приближении поперечных компонентов осредненной скорости получено неоднородное линейное уравнение в частных производных четвертого порядка. Все коэффициенты уравнения являются известными непрерывными и непрерывно-дифференцируемыми функциями координат в области $0 \leq x_2 \leq b$; $0 \leq x_3 \leq B$. Уравнение распадается на систему из двух уравнений, если ввести вихрь скорости $\Delta \psi = W$, т.е.

$$\begin{cases} \Delta W + d(x_2, x_3) \frac{\partial W}{\partial x_2} + c(x_2, x_3) \frac{\partial W}{\partial x_3} = f(x_2, x_3) \\ \Delta \psi = W \end{cases},$$

где

$$d(x_2, x_3) = \frac{2}{K} \frac{\partial K}{\partial x_2}, \quad c(x_2, x_3) = \frac{2}{K} \frac{\partial K}{\partial x_3},$$

$$f(x_2, x_3) = \frac{1}{K} \frac{\partial^2}{\partial x_2 \partial x_3} a_1 K \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_2} - \frac{\partial u_1}{\partial x_3} \right).$$

При назначении граничных условий для вихря скорости принимается, что поперечные скорости имеют максимум в толще пристенного слоя, на расстоянии $\theta < \delta_i$. При вычислении a_i использовались обобщения для a_{12} , a_{32} , выполненные В.П.Бобковым, М.Х.Ибрагимовым, Г.И.Сабелевым.

Таким образом, приходим к следующим задачам Дирихле: в прямоугольнике $\theta < x_2 < H; \theta < x_3 < B$, найти функцию W , удовлетворяющую уравнению

$$\Delta W + d(x_2, x_3) \frac{\partial W}{\partial x_2} + c(x_2, x_3) \frac{\partial W}{\partial x_3} = f(x_2, x_3)$$

и принимающую на границе значения

$$W|_r = 0,$$

и затем функцию ψ , удовлетворяющую уравнению

$$\Delta \psi = W$$

и принимающую на границе значение

$$\psi|_r = 0.$$

Попытка получить точные решения уравнений в явном виде, в виде конечной формулы, а также приближенные решения в аналитической форме не увенчалась успехом из-за сложности коэффициентов и свободного члена. Поэтому для решения задачи использован приближенный численный метод - метод сеток. Задача решена на ЭВМ "Минск-22 М" в режиме работы Т. Максимальное число узлов сетки ограничивалось памятью машины и наличием стандартных программ для решения систем линейных алгебраических уравнений и могло составить не более 88. Поэтому была выбрана сетка с 9 узлами по вертикали и 9 по горизонтали. Представляется очевидным, что наиболее важно знать распределение скоростей у границ. Поэтому была принята сетка с неравномерным шагом и узлами, находящимися от начала координат на расстояниях

$$x_3^i = \delta_3 \cdot i \cdot e^{b(i-1)}, \quad i = 1, 2 \dots 9,$$

$$x_2^j = \delta_2 \cdot j \cdot e^{a(j-1)}, \quad j = 1, 2 \dots 9.$$

где h и b - константы, такие что $x_3^{10} = B$, $x_2^{10} = H$. Очевидно, что если $i = 1$, $j = 1$, то $x_2' = \delta$ и $x_3' = \delta_3$.

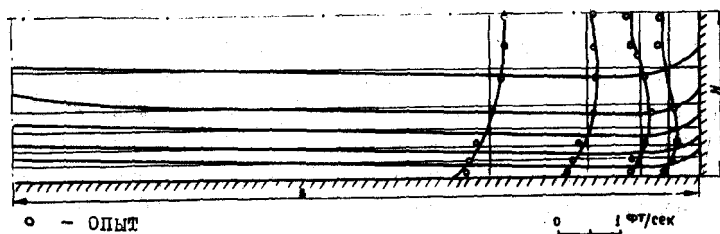
Замена производных разностными отношениями приводит к системам неоднородных линейных алгебраических уравнений. После решения уравнений для W_{ij} и затем для ψ_{ij} вычислялись поперечные компоненты осредненной скорости для области у границ, где шаг мал, через конечно-разностные отношения, а для области вдали от границы строился аппроксимационный полином Лагранжа и от него вычислялась производная.

Программой расчета предусмотрена выдача результатов в двух формах: в табличном виде, где приведены значения координат и скоростей, и в графической форме - в виде графиков распределения поперечных скоростей на вертикали и горизонтали. В диссертации результаты расчетов для всех опытов автора представлены в виде эппр распределения поперечных скоростей на вертикалях и горизонталях, а для двух крайних глубин и средней ($H_i = 0,600; 0,300$ и $0,141$ м) дополнительно приведены в приложениях в табличном виде.

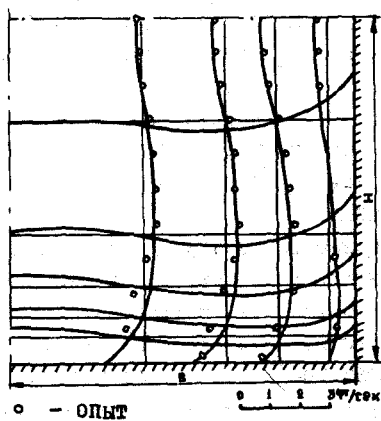
Сравнение расчетов поперечных компонентов осредненной скорости с экспериментальными данными Н. Tracy, Е. Brundrett, W. Baines и автора представлены на рис. 7. Выполненные сравнения позволяют прийти к следующим выводам. С качественной стороны расчетное распределение скорости хорошо согласуется с экспериментальными данными. Получено, что в квадратном сечении поперечные течения направлены действительно по биссектрисе угла. При отклонении прямоугольного сечения от квадрата поперечные течения сдвинуты от угла вдоль большей стороны. Таким образом, получено полное качественное совпадение расчетных данных с экспериментальными.

Проанализируем согласование расчетных и экспериментальных данных с количественной стороны. Из рис. 7 а), 7 б), видно, что расчеты хорошо согласуются с экспериментальными данными Н. Tracy, Е. Brundrett, W. Baines, полученными измерениями в закрытых потоках с гладкими стенками. Экспериментальные скорости, полученные автором в открытом потоке с шероховатыми стенками и представленные на рис. 7 в), больше расчетных в 2-3

а) I.Tracy



б) E.Brundrett, W.Baines



в) автора

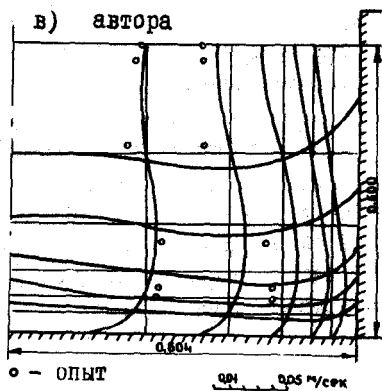


Рис. 7 Сравнение расчетных поперечных скоростей с опытными данными

раза, хотя качественная картина течений согласуется полностью. Уменьшенные значения расчетных поперечных скоростей в открытых каналах имеют следующее объяснение. В расчете использованы отношения α_{12} , α_{32} , полученные В.П.Бобковым, М.Х. Ибрагимовым, Г.И.Сабелевым обобщениями измерений в закрытых потоках с гладкими стенками. Для аналогичных обобщений в открытых потоках в случае шероховатых стенок имеется очень мало экспериментальных данных. Вместе с тем естественно полагать, что анизотропность турбулентных течений в открытых потоках и в случае шероховатых стенок выше. Это значит, что можно ожидать больших значений α , а, следовательно, и скоростей. Этими причинами, на наш взгляд, объясняются меньшие величины расчетных поперечных скоростей в открытых потоках.

Все сказанное относительно качественного и количественного согласования расчетных данных с экспериментальными и в случае открытых потоков позволяет сделать вывод об их удовлетворительном согласовании.

Таким образом, сравнение расчетных данных с экспериментальными как в случае закрытых, так и открытых потоков позволяет сделать вывод о том, что создан метод расчета первого приближения трехмерного поля осредненных скоростей, пригодный в случае гладких и шероховатых русел и во всех областях сопротивления.

В диссертации рассматривается приложение исследований к разработке способов рационального крепления каналов на участках, где движение близко к однородному по длине. Предлагается усиленное крепление тех мест периметра, где из-за существования поперечных компонентов скорости создаются условия для местного нарушения устойчивости сечения. Приводятся натурные и лабораторные данные, подтверждающие целесообразность такого крепления.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

I. Для расчета различных явлений важно знание трехмерного поля осредненных скоростей, так как поперечные компоненты осредненной скорости вносят значительный вклад в процессы обмена, придавая новые качества различным явлениям.

2. Из анализа экспериментальных исследований полей осредненных скоростей следует, что, несмотря на большое количество экспериментальных данных, исследования, как правило, ограничивались измерением только продольного компонента, при этом однородность по длине потока не контролировалась. Поэтому в литературе не имеется достаточных экспериментальных доказательств существования поперечных компонентов осредненной скорости в однородных по длине потоках.

3. Анализ теоретических исследований показал, что существуют полуэмпирические методы расчета распределения только продольного компонента осредненной скорости. Все они носят гипотетический характер и являются приближенными. Общие методы расчета поперечных компонентов осредненной скорости отсутствуют. Появившиеся в последнее время предложения по расчету поперечных компонентов относятся к потокам с гладкими стенками и основаны на обобщении немногочисленных экспериментальных данных.

4. Для экспериментальной проверки существования поперечных компонентов осредненной скорости в однородных по длине потоках необходима постановка специальных экспериментов, в которых достигалось бы однородное по длине движение и была создана возможность измерения распределения продольных и поперечных компонентов скорости.

5. Создана и испытана по специальной программе экспериментальная установка, позволившая подучить однобокий по длине поток.

6. Предложен однополюсный способ формирования импульсов для регистрации числа оборотов лопастного винта, позволивший создать микровертушку, превосходящую по основным характеристикам аналогичные приборы, с помощью которой было возможно выполнить детальное экспериментальное исследование распределения по сечению продольного компонента осредненной скорости. Однополюсная микровертушка нашла применение в различных организациях.

7. Разработан прибор для измерения осредненного направления вектора скорости - фотоэлектрический угломер, - который позволил непосредственным измерением устанавливать существование поперечного компонента осредненной скорости.

8. Проведенное экспериментальное исследование позволяет сделать убедительный вывод о существенной трехмерности поля осредненных скоростей в однородных по длине потоках.

9. Установлена зависимость нормальных компонентов тензора турбулентных напряжений от осредненных скоростей и представлена в более общем виде гипотеза о связи между тензором турбулентных напряжений и осредненными скоростями.

10. Предложенная обобщенная зависимость для тензора турбулентных напряжений позволила получить систему уравнений движения для двухпараметрических потоков. Показано, что систему целесообразно замыкать, используя формулы распределения по сечению продольной скорости.

11. Предложена полуэмпирическая формула для расчета распределения продольного компонента осредненной скорости в потоке прямоугольного сечения.

12. Получена формула для расчета распределения по прямоугольному сечению кинематического коэффициента суммарной вязкости.

13. Разработан приближенный метод расчета поперечных компонентов осредненной скорости в потоке прямоугольного сечения, пригодный как в случае гладких, так и шероховатых стенок и во всех областях сопротивления. Создана программа счета на ЭВМ.

14. Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными позволяет сделать вывод о том, что в первом приближении решена трехмерная задача о распределении осредненных скоростей в однородных по длине потоках прямоугольного сечения.

15. На основе решения трехмерной задачи применительно к другим формам сечений возможно определять наиболее неустойчивые места периметра поперечного сечения потока и предложить экономичные способы их крепления.

По теме диссертации опубликованы следующие работы автора:

1. К определению поперечных скоростей и скоростных коэффициентов при равномерном движении жидкости. "Материалы Республиканского научно-технического совещания по изучению, комплексному использованию и охране водных ресурсов", т.6, Минск, 1965.

2. Координатный вид формулы распределения продольных скоростей при равномерном турбулентном движении жидкости. Сб. "Вопросы водного хозяйства Белоруссии", Минск, "Наука и техника", 1965.

3. Однополюсная микровертушка. Сб. "Водное хозяйство Белоруссии", Минск, 1965.

4. Исследование распределения осредненных скоростей на прямолинейном участке призматического русла. Сб. "Использование и охрана водных ресурсов Белоруссии", ч.2, Минск, 1966 (соавторы: Великевич П.А., Коваленко Э.П., Нероненя Л.С.).

5. Угломер для измерения осредненного направления вектора скорости. Сб. "Использование и охрана водных ресурсов Белоруссии", ч.2, Минск, 1966 (соавторы: Нероненя Л.С.).

6. Дифференциальные уравнения движения двухпараметрических прямолинейных потоков. Сб. "Вопросы водохозяйственного строительства", Минск, 1968.

7. Малогабаритная микровертушка. "Гидротехника и мелиорация", № 7, 1968 (соавторы: Нероненя Л.С.).

8. Об одном преобразовании основного уравнения И.С.Громека для двухпараметрического потока. Сб. "Комплексное использование и охрана водных ресурсов", "Наука и техника", Минск, 1968.

9. К экспериментальному изучению распределения осредненных скоростей в двухпараметрических прямолинейных потоках. Сб. "Использование водных ресурсов", "Наука и техника", 1969.

10. О существовании дополнительных нормальных турбулентных напряжений в турбулентном потоке с градиентом осредненной скорости. Сб. "Использование водных ресурсов", "Наука и техника", Минск, 1969.

11. Микровертушка. Тр. совещаний по гидротехнике. Вып. 51, Л., 1969 (соавторы: Неронян Л.С.).

12. К экспериментальному изучению распределения осредненных скоростей в двухпараметрических потоках прямоугольного сечения, Сб. "Вопросы водохозяйственного строительства", Минск, 1969.

13. К расчету распределения продольных скоростей в двухпараметрических прямолинейных потоках. Сб. "Водное хозяйство Белоруссии", изд. "Высшая школа", 1971 (в печати).

14. К расчету распределения осредненных продольных скоростей в двухпараметрических прямолинейных потоках прямоугольного поперечного сечения. Сб. "Вопросы водохозяйственного строительства", Минск, 1970 (соавтор: Харченко В.Д.).

15. Распределение суммарной вязкости в потоке прямоугольного сечения. Сб. "Проблемы использования водных ресурсов", Минск, 1971.

Результаты работы доложены на Республиканском научно-техническом совещании по изучению, комплексному использованию и охране водных ресурсов в 1965 г. (г.Минск), на XII научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава Белорусского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института в 1968 г. (г.Минск), на общегородском семинаре по гидромеханике и теории упругости при Белорусском Ордена Трудового Красного Знамени Государственном университете в 1970 г. (г.Минск), на республиканском семинаре по гидродинамике гидротехнических сооружений при Институте гидромеханики АН УССР в 1971 г. (г.Киев), на семинаре отдела прикладной гидродинамики ордена Трудового Красного Знамени Института гидродинамики СО АН СССР в 1971 г. (г.Новосибирск).

Ам 03233

Подписано к печати 28.1V.71 г. Формат 60/84^{1/16}

Объем 1,8 п.л. Тираж 200 экз. Заказ №259.

Отпечатано на ротационте НИИЭМП при Госплане БССР.
Минск, Славинского 1.