

УДК 532.517.4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТНОЙ СТРУКТУРЫ И ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ В НЕУСТАНОВИВШИХСЯ НАПОРНЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОТОКАХ

С. Б. МАРКОВ

(Киев)

Приводятся результаты экспериментального исследования скоростной структуры и гидравлических сопротивлений неустановившихся напорных турбулентных потоков в гладком канале. Дано описание экспериментальной установки и методики исследования кинематической структуры и сопротивления при неустановившемся движении. Получено распределение осредненной скорости, продольных и вертикальных пульсационных скоростей, турбулентного трения и измерена величина гидравлического сопротивления при ускоренном и замедленном движениях. На основе проведенных исследований получены эмпирические зависимости для описания распределения кинематических характеристик и сопротивления при неустановившемся турбулентном движении в гладком канале.

Нестационарные турбулентные течения в трубах до настоящего времени мало изучены. Экспериментальное исследование такого движения затруднено тем, что турбулентный поток сам по себе уже является нестационарным и, кроме того, статистические характеристики потока изменяются непрерывно во времени. Поэтому воспользоваться известными методами исследований равномерных потоков, в частности использовать временное осреднение, здесь невозможно.

Из немногочисленных исследований, посвященных в основном экспериментальному определению коэффициента гидравлического трения при неустановившемся напорном турбулентном движении, можно отметить работы Шульц-Грюнова [1], Лийва [2], А. Н. Панчурина [3], С. В. Денисова [4], а также исследования, проведенные в Массачусетском технологическом институте [5, 6].

Результаты исследований перечисленных выше работ противоречивы не только в количественном, но и в качественном смысле. Кинематическая структура неустановившихся потоков, за исключением распределения осредненной скорости в работах [1] и [2], вообще не исследовалась.

1. В Институте гидромеханики АН УССР в 1967—68 гг. были выполнены экспериментальные исследования скоростных характеристик потока и сопротивления при неустановившемся напорном турбулентном движении. Эксперименты проводились в горизонтальной гидродинамической трубе прямоугольного поперечного сечения 380×400 мм², длиной 6,5 м, оборудованной плавным входом, выполненной из органического стекла.

Неустановившийся режим движения создавался с помощью автоматического затвора щелевого типа, установленного в конце трубы. Изменяя число оборотов и направление вращения электродвигателя, соединенного приводом с указанным затвором, создавались неустановившиеся режимы течения в трубе с различными по величине и знаку ускорениями.

Исследование кинематических характеристик потоков производилось методом фотовизуализации. В качестве индикатора была использована алюминиевая мелкодисперсная пудра. Суспензия обезжиренной алюминиевой пудры по резиновым шлангам вводилась во входное сечение трубы. Фотосъемка скоростного потока производилась в вертикальной плоскости по продольной оси трубы, в створе, находящемся на расстоянии 4,7 м от входа в трубу, где течение уже было полностью стабилизированным.

С целью получения наиболее достоверных и полных данных о скоростной структуре потоков особенно вблизи стенки производилась фотосъемка двух областей течений: области ядра потока (от дна трубы до уровня, расположенного на 1 см выше продольной оси симметрии) и области, прилегающей ко дну (размер ее по вертикали составлял 0,8 см). Фотосъемка ядра потока выполнялась фотоаппаратом «Зенит-3М» с объективом «Гелиос-40» на негативную пленку РФ-3. В качестве светового источника были использованы три фотовспышки «ФИЛ-40», смонтированные в один блок. Интервал времени между вспышками регулировался оборотами электродвигателя с контактной панелью и составлял в данных опытах от 0,0015 до 0,0066 сек. При проверке контактного устройства отклонения от заданной величины интервала времени между вспышками не превышали 10^{-6} сек.

При съемке структуры течения у дна была использована та же фотоаппаратура, что и при съемке ядра течения, но с применением переходных колец. В качестве источника света была использована электронная коммутация ламп-вспышек, разработанная и сконструированная в Институте гидромеханики АН УССР. Ступенчатая регулировка интервала времени между вспышками позволяла получать следующие выдержки: $7 \cdot 10^{-6}$, $280 \cdot 10^{-6}$, $1 \cdot 10^{-3}$ и $4 \cdot 10^{-3}$ сек.

Значения кинематических характеристик потока получали методом осреднения по статистическому ансамблю, подробно изложенному, например, в работе [7]. Необходимые расчетные данные получали многократным повторением опыта при одних и тех же начальных и граничных условиях. В качестве исходных моментов при исследовании ускоренных и замедленных течений были приняты крайние положения открытого щелевого затвора, при которых в трубе устанавливалось определенное равномерное турбулентное течение с определенными характеристиками. Осредненные значения кинематических характеристик в каждой рассматриваемой точке потока находились по 200—250 мгновенным значениям статистического ряда.

Для исследования перепада давления при неустановившемся движении производилась запись на осциллограмму показаний двух «точечных» индуктивных датчиков давлений [8], расположенных по обе стороны от рабочего створа на расстоянии 1.1 м друг от друга. Собственная частота таких датчиков в воде составляла ≈ 600 гц. Так как автор интересовался осредненное давление, процесс изменения которого был, естественно, низкочастотным, то подсчитанная для датчика ошибка по фазе и амплитуде по формулам И. А. Чарного [9] практически равнялась нулю. С целью получения максимальной точности на осциллограмму записывалась разность между изменяющимся во времени перепадом давления неустановившегося процесса и перепадом давления для исходного равномерного режима.

Тарировка датчиков давления производилась статическим способом в начале и в конце каждого опыта. При записи показаний датчиков давления на осциллограмму включался отметчик времени через 0.1 сек и делались отметки, соответствующие моментам замыкания контактов, при которых производилась фотосъемка скоростной структуры потока. Проведение эксперимента было автоматизировано.

Пользуясь вышеизложенным методом фотовизуализации для исследуемых равномерных и неустановившихся потоков, были получены распределения осредненных продольных скоростей $\bar{u}_1(x_2)$, среднеквадратичные значения пульсационных скоростей \bar{u}_1' и \bar{u}_2' и значения одноточечных моментов второго порядка $u_1' u_2'$ (где x_2 — вертикальная координата).

Равномерное течение в трубе исследовалось при четырех числах Рейнольдса: $Re_n = 16350, 32900, 54000, 72500$. Как показало наложение на график Никурадзе определенных экспериментально значений коэффициентов сопротивления λ_0 , исследуемое течение относится к движению в области сопротивления гладких русл.

2. Анализ распределения продольных скоростей при равномерном движении показал, что полученные профили в ядре потока довольно хорошо совпадают с зависимостями Прандтля, Кармана, Никурадзе [10], Бай Ши-и [11], а в области стенки хорошо согласуются с результатами исследований Лауфера [12] и Конт-Белло [13]. Формула И. К. Никитина [14] дает хорошее совпадение вблизи стенки, но немного заниженные значения в ядре потока. На основе формулы И. К. Никитина и данных автора получена эмпирическая зависимость для распределения осредненной продольной скорости по глубине равномерного потока

$$U_1 = \bar{u}_1 / u_* = 5.6 \lg(x_2 / \delta) + 10 - 4.4 \delta / x_2 \quad (2.1)$$

Здесь u_* — динамическая скорость, δ — толщина вязкого подслоя, равная $5.6 \nu / u_*$, ν — кинематический коэффициент вязкости.

Анализ распределения продольных и вертикальных пульсационных скоростей в толще потока при равномерном движении показал хорошее совпадение полученных данных с результатами исследований Конт-Белло [13], Рейхардта [15], Лауфера [12].

Имеющиеся экспериментальные данные позволили получить следующие зависимости для распределения пульсационных скоростей.

Для продольных скоростей

$$U_1' = \bar{u}_1' / u_* = \gamma + \alpha [\beta + (x_2 - \delta) / (h - \delta)]^{-1} \quad (2.2)$$

где $\beta = 0.44$, $\alpha = 0.906$, $\gamma = 0.43$, $h = 0.5 H$ — половина высоты трубы.

Формула (2.2) справедлива для области течения $x_2 \geq \delta$. При $0 < x_2 \leq \delta$ распределение величины U_1' , как показали исследования, можно принять изменяющимся по линейному закону.

Для вертикальных скоростей

$$U_2' = \bar{u}_2' / u_* = \xi [a\xi^2 + b\xi + c]^{-1} \quad (2.3)$$

где $a = 1.23$, $b = 0.583$, $c = 0.025$ — коэффициенты, $\xi = x_2 / h$.

Значения λ_0 , подсчитанные через касательное напряжение по данным кинематики и с помощью измеряемого перепада давления различались между собой на 5–10%, что не превышает, в свою очередь, точности экспериментального определения величин $u_1' u_2'$ и объясняется еще тем, что труба была недостаточно плоской. По данным опытов были вычислены также одноточечные коэффициенты корреляции

$$-k_0 = -\overline{u_1' u_2'} / \bar{u}_1' \bar{u}_2'$$

оказавшиеся близкими к измерениям этих величин в опытах Лауфера [12].

Полученные выше результаты для равномерных потоков были использованы для анализа кинематических характеристик при неустановившемся движении.

3. Для оценки нестационарности была принята безразмерная величина N — параметр нестационарности ($N = (H/u^2)(du/dt)$) где u — средняя скорость. Этот параметр уже использовался ранее при изучении неустановившегося движения и может рассматриваться как некоторое обобщенное число Струхала [7].

На фиг. 1, a и b в логарифмических координатах приведено распределение осредненных продольных скоростей для исследуемых неустановившихся потоков. Здесь и далее условные обозначения соответствуют потокам, числа Рейнольдса и параметры нестационарности которых даны в таблице

Ускоренное движение			Замедленное движение		
номера опытов	Re_H	N	номера опытов	Re_H	N
1	72300	0.0137	11	54250	—0.018
2	72000	0.0193	12	54300	—0.028
3	46600	0.0296	13	54360	—0.051
4	46350	0.054	14	54400	—0.056
5	46000	0.0643	15	33950	—0.072
6	31200	0.0763	16	34800	—0.101
7	45000	0.0776	17	34400	—0.105
8	29400	0.132	18	18500	—0.213
9	28500	0.214	19	19500	—0.301
10	29300	0.201			

На фиг. 1 сплошной линией показано распределение продольной осредненной скорости для равномерного движения, соответствующее зависимости (2.1). Анализ эиур скоростей показал, что профили скоростей при ускоренном движении становятся более полными, а при замедленном движении — менее полными, чем соответствующие профили скоростей при равномерном движении. Значение динамической скорости u_* в каждом опыте было определено через величину градиента скорости у дна.

Определенный интерес представляет определение толщины вязкого подслоя δ при неустановившемся движении, для определения которого использована методика, предложенная И. К. Никитиным [16]. Анализ изменения величин δ под воздействием ускорения показывает следующее: чем больше

по абсолютной величине параметр нестационарности, тем более уменьшается величина δ при замедленном движении. При этом

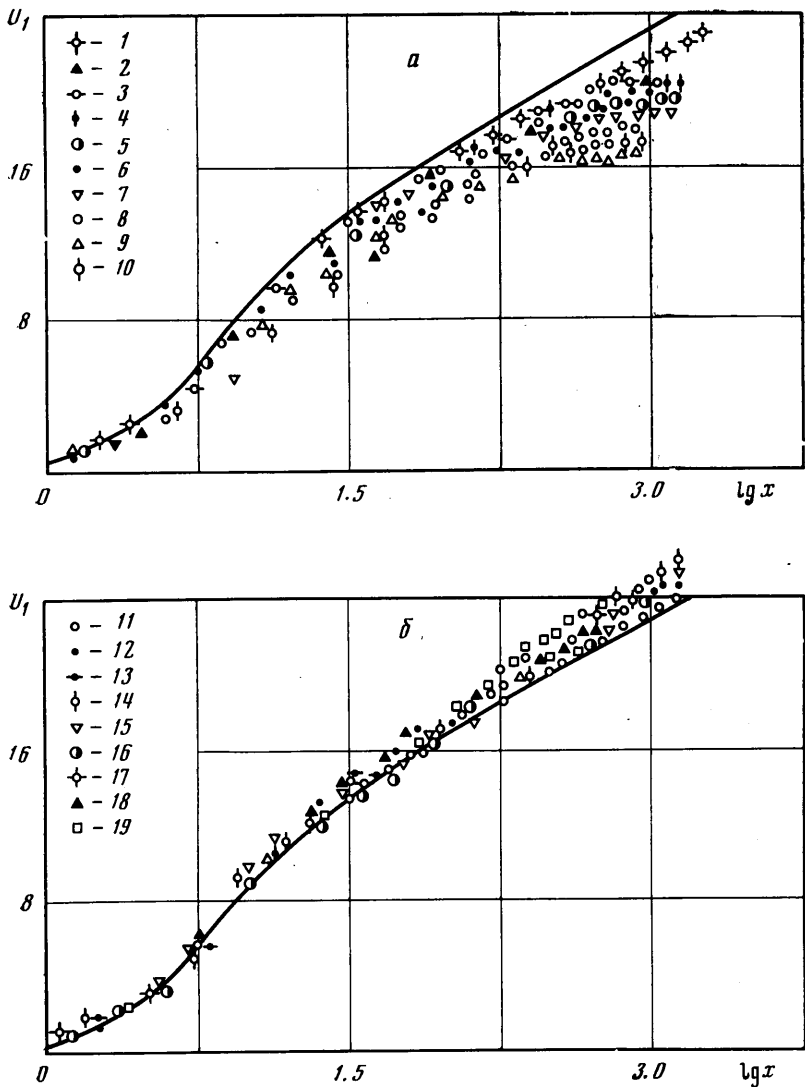
$$\delta = k_{\pm} A_0 u_* / \nu \quad (3.1)$$

где k_{\pm} — коэффициент, учитывающий нестационарность потока (плюс соответствует ускоренному движению, минус замедленному движению), A_0 — значение U_1 на границе вязкого подслоя при равномерном движении по данным исследований $A_0 = 5.6$.

Зависимость $k_{\pm} = f(N)$ по данным исследований имела линейный характер

$$k_{\pm} = 1 - S_{\pm}(N) \quad (3.2)$$

где при ускоренном движении $S_+ = 0.761$, при замедленном движении $S_- = 0.333$.



Фиг. 1 а, б

Анализируя экспериментальные данные, были получены следующие эмпирические зависимости для распределения безразмерных продольных осредненных скоростей при неустановившемся движении. Для ускоренного движения $n = -1$, а для замедленного движения $n = 1$.

$$U_1 = (5.6 \lg(x_2 / \delta) + 10 - 4.4 \delta / x_2) [a_1 + b_1 \xi^{-1} + c_1 \xi^{-2}]^n \quad (3.3)$$

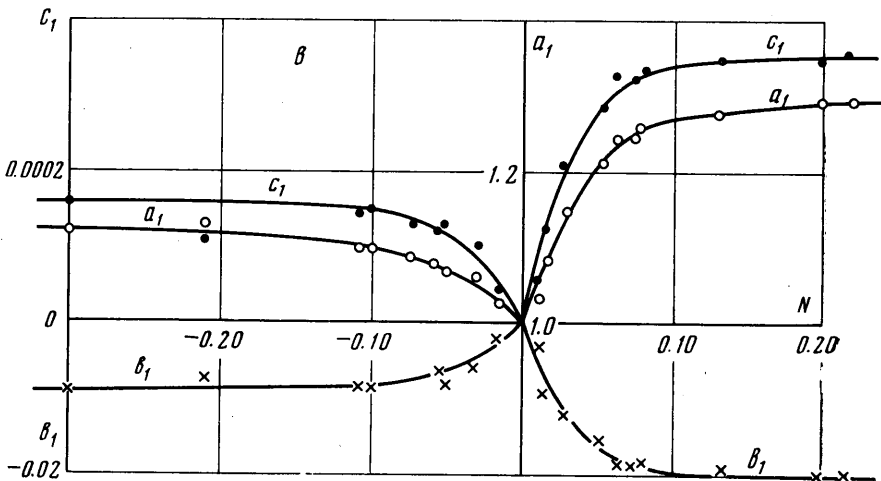
Здесь a_1, b_1, c_1 — коэффициенты, зависящие от параметра нестационарности. Значения коэффициентов a_1, b_1 и c_1 в функции параметра нестационарности удобнее всего брать из графиков на фиг. 1, в.

4. Исследование распределения продольных пульсационных скоростей проводилось для потоков с приблизительно равными числами Re, но с разными величинами параметра нестационарности, путем их сравнения с соответствующими данными равномерных потоков.

На фиг. 2, а и б приведены распределения продольных пульсационных скоростей для ускоренных и замедленных потоков. Хорошо видно, что интенсивность турбулентности в ядре ускоренного потока ниже, а при замедленном движении — выше, чем в потоках с равномерным режимом движения. С ростом параметра нестационарности это различие становится все более существенным, доходя до 100–150% уровня распределения при равномерном движении.

На расстоянии от стенки $x_2 u_* / \nu = X = 40 \div 50$ при ускоренном движении абсолютные значения величин U_1' становятся равными величине U_1' при равномерном движении. Затем величины U_1' вплоть до границы вязкого подслоя превышают уровень распределения величины U_1' при равномерном движении. Эпюра продольных пульсационных скоростей при ускоренном движении по форме подобна аналогичной эпюре распределения при равномерном движении. Пик эпюры U_1' близко расположен к границе вязкого подслоя. Наибольшее превышение максимума эпюры U_1' при ускоренном движении над максимумом соответствующей эпюры U_1' при равномерном движении достигало 30%.

В толще вязкого подслоя распределение величин U_1' при ускоренном движении можно приближенно принять изменяющимся по линейному закону и близким к распределению при равномерном движении. При замедленном движении значение величин U_1' вблизи стенки, вплоть до границы вязкого подслоя, превышает соответствующие значения для равномерного



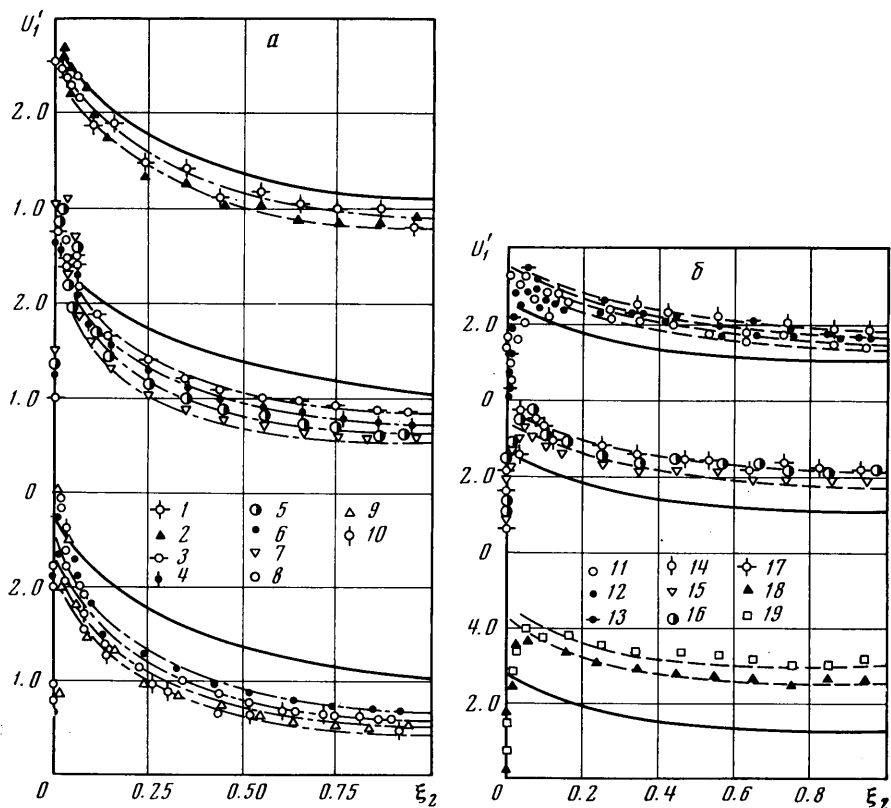
Фиг. 1 в

движения. В толще вязкого подслоя при малых ускорениях распределение величин U_1' близко, а при больших параметрах нестационарности превышает уровень турбулентности при равномерном течении.

Для описания распределения продольных пульсационных скоростей в толще потока при неустановившемся движении использована формула (2.2). Анализируя экспериментальные данные, были вычислены значения коэффициентов α , β и γ и построены графики этих величин в функции параметра нестационарности (фиг. 2, а).

Аналогичное исследование было проведено для распределения вертикальных пульсационных скоростей при неустановившемся движении. При этом оказалось, что в толще ускоренных потоков имеет место уменьшение, а при замедленном движении — увеличение относительных вертикальных пульсационных скоростей по сравнению с соответствующими значениями для равномерного течения (фиг. 3). Эти расхождения тем существеннее, чем больше параметр нестационарности потока. Так, в ядре течения неустановившихся потоков величины U_2' в 1.5–2 раза отличаются от величин U_2' при равномерном движении. По своей форме эпюра вертикальных пульсационных скоростей при ускоренном движении подобна эпюре вертикальных пульсационных скоростей при равномерном движении. Относительная координата ξ_2 пика эпюры с ростом параметра N незначительно уменьшается.

При замедленном движении эпюра вертикальных пульсационных скоростей в ядре потока выравнивается, пик эпюры сглаживается и его относительная координата с ростом параметра нестационарности увеличивается.



Фиг. 2 а, б

В области дна при ускоренном движении имеет место уменьшение вертикальных пульсационных скоростей, а при замедленном движении — увеличение вертикальных пульсационных скоростей по сравнению с уровнем распределения для равномерного движения. Это различие существенно зависит от нестационарности потока.

На основе имеющихся экспериментальных данных было установлено, что распределение вертикальных пульсационных скоростей при неустановившемся движении соответствует соотношению (2.3), в котором коэффициенты a , b и c зависят от параметра нестационарности.

Для ускоренного движения

$$a = 1.23 + 2.60N, \quad b = 0.583 + 13.40(N)^{1.84}, \quad c = 0.025 = \text{const} \quad (3.4)$$

Для замедленного движения

$$a = 1.23 + 3.60N, \quad b = 0.583 + 0.455N, \quad c = 0.025 + 0.06N \quad (3.5)$$

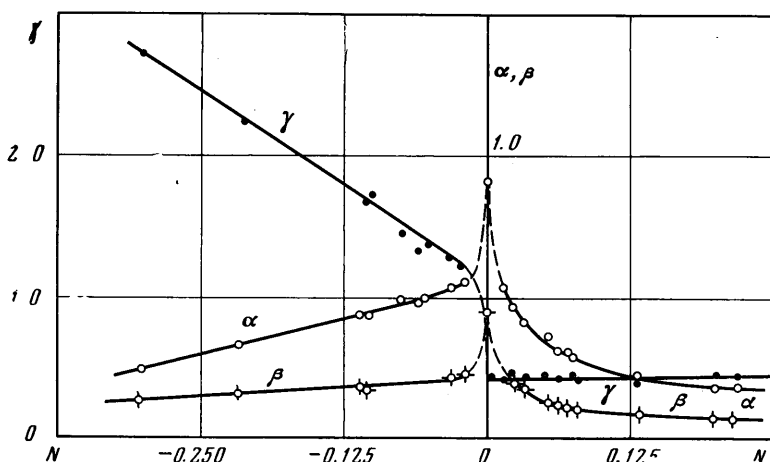
4. Анализ распределения величин $-\overline{u_1' u_2'} / u^2$ и $-\overline{u_1' u_2'} / u_*^2$ при неустановившемся движении показал, что в толще ускоренного потока турбулентное трение меньше, а при замедленном движении — больше, чем при равномерном движении. В области стенки, особенно вблизи границы вязкого подслоя, с точностью до экспериментального определения величин $\overline{u_1' u_2'}$ наблюдается обратная картина: турбулентное трение при ускоренном движении больше, а при замедленном движении — меньше, чем турбулентное трение равномерного потока.

По данным о кинематических характеристиках неустановившихся потоков были определены величины касательного напряжения на стенке τ_0 и построены эпюры касательных напряжений в ускоренных и замедленных потоках. При этом значение касательного напряжения в любой точке потока определялось как

$$\tau / \rho = \nu d\bar{u}_1 / dx_2 - \overline{u_1' u_2'} \quad (4.1)$$

а значение касательного напряжения на стенке τ_0 определялось по градиенту скорости у дна между значениями $\bar{u}_1 = 0$ при $x_2 = 0$ и значением \bar{u}_1 в точке, ближайшей к стенке.

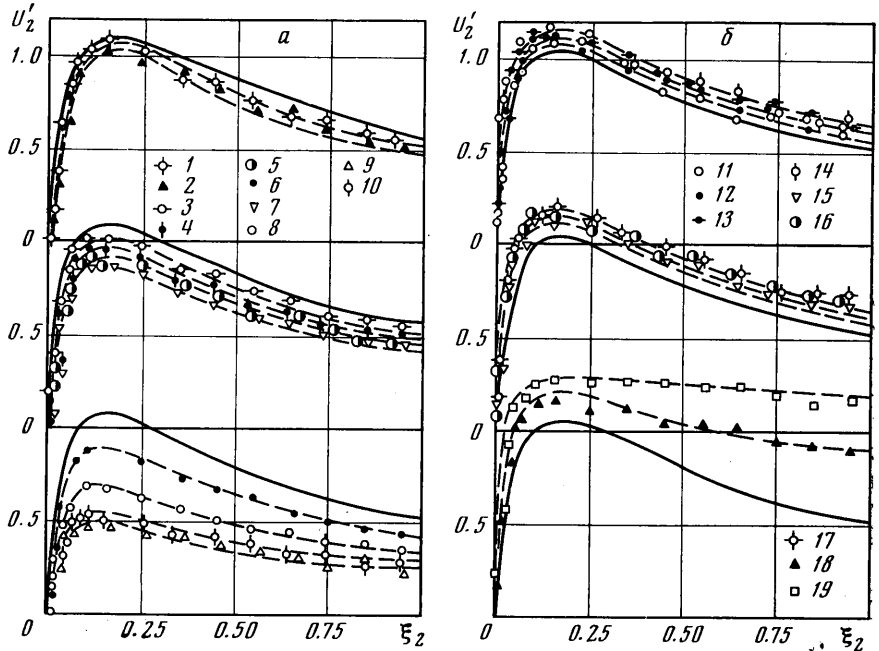
Видно, что при неустановившемся движении, как это вытекает и из теоретических соображений, касательное напряжение изменяется по глу-



Фиг. 2 в

бине потока существенно иначе, чем при равномерном движении (фиг. 4, а и б). При ускоренном движении эпюра $\tau / \tau_0 = f(\xi_2, N)$ свою выпуклостью обращена вниз, при замедленном движении — вверх.

Как показали исследования, изменение по глубине коэффициента корреляции $-k$ при неустановившемся движении особенно в области $\xi_2 =$



Фиг. 3

$= (0.05 \div 1)$ с точностью эксперимента совпадает с таковым для равномерного потока.

По найденным с помощью кинематических характеристик значениям величин касательных напряжений на стенке τ_0 были определены значения коэффициентов сопротивления λ для неустановившихся потоков

$$\lambda = 8\tau_0 / \rho u^2 \quad (4.2)$$

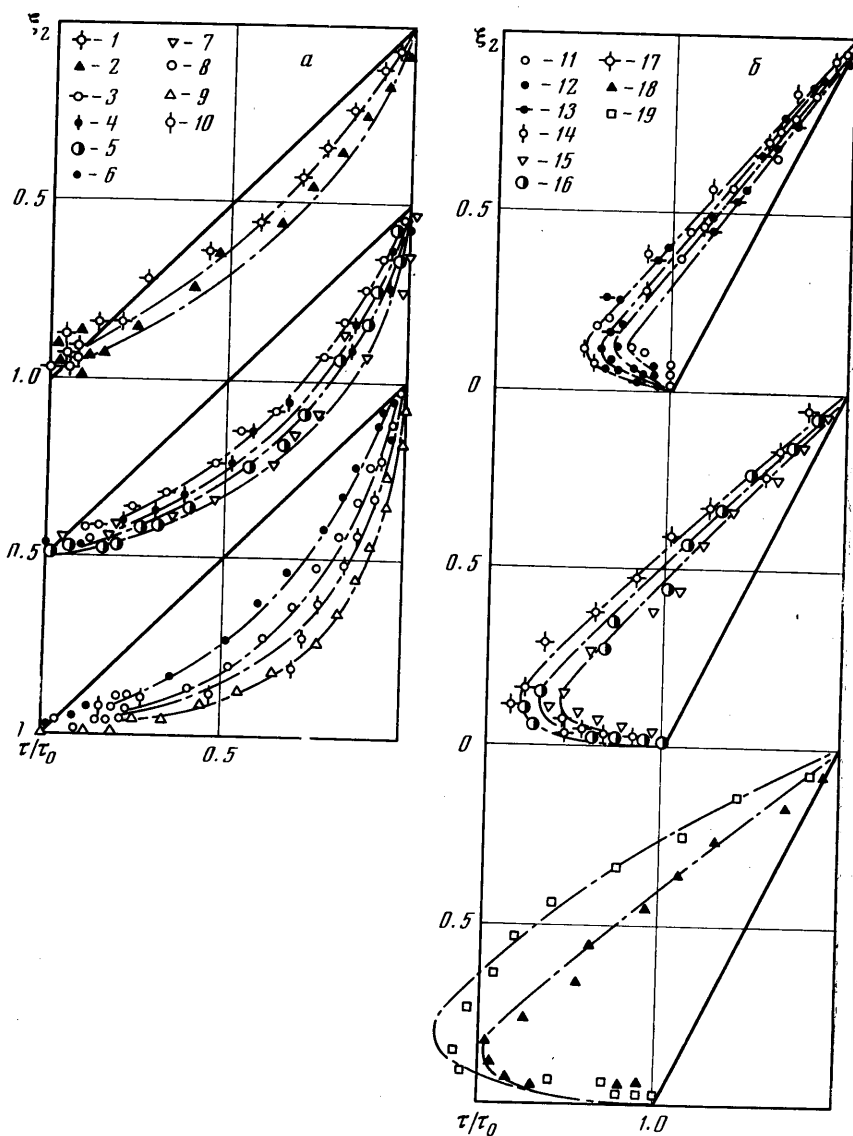
Для контроля полученных значений λ были вычислены значения коэффициентов гидравлического трения λ по данным осциллограмм перепадов давлений, полученных с помощью индуктивных датчиков давлений. При этом величина гидравлического уклона трения J_f определялась как разность между записываемым общим уклоном J и инерционным уклоном

$$J_f = J - \frac{\alpha_0}{g} \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{1}{g} u \frac{\partial \alpha_0}{\partial t} \quad (4.3)$$

где α_0 — корректив скорости, определяемый графо-аналитическим способом по профилям скоростей, g — ускорение свободного падения.

Значения λ , вычисленные по данным осциллограмм, оказались (как и при исследовании равномерного движения) на 5–10% выше значений λ , полученных по кинематическим характеристикам потока. В дальнейшем за истинные были приняты значения λ , полученные по кинематическим характеристикам потока.

Анализ вычисленных значений λ (фиг. 5) показал, что с ростом параметра N (по абсолютной величине) при ускоренном движении имеет место увеличение значения λ , а при замедленном движении уменьшение этой величины по сравнению со значением λ_0 для равномерного потока. По этим



Фиг. 4

данным были подобраны эмпирические зависимости для определения величины λ при неустановившемся движении

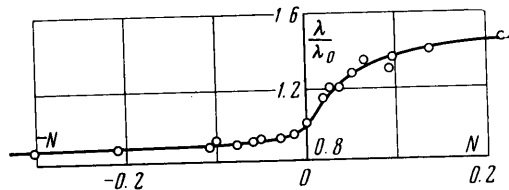
$$\lambda_+ = \lambda_0 [-0.43 \exp(-23.0N) + 1.43] \quad (4.4)$$

$$\lambda_- = \lambda_0 [12.76N^2 - 1.38N + 1] \exp 3.67N \quad (4.5)$$

Проведенные исследования и полученные эмпирические зависимости позволяют при заданном сечении, средней скорости и параметре нестационарности потока получить распределение продольной осредненной скорости

ти, распределение продольных и вертикальных пульсационных скоростей, а также определить величину касательного напряжения на стенке и коэффициент гидравлического трения.

Так как полученные зависимости являются эмпирическими, то без дополнительных исследований они не могут быть экстраполированы за область исследуемых параметров ($-0.301 \leq N \leq 0.214$).



Фиг. 5

В заключение отметим следующее: анализ возможных случайных и систематических ошибок, выполненный применительно к методике и аппаратуре исследований, показал, что измерение профилей скоростей было выполнено с точностью до 1%, измерение распределения продольных и вертикальных пульсационных скоростей — 6–7%, измерение распределения касательных напряжений — 18–20%. Измерение коэффициента гидравлического сопротивления с помощью индуктивных датчиков давлений было выполнено с точностью $\pm 5\%$.

Поступила 9 XI 1974

ЛИТЕРАТУРА

- Schulz-Grunow F. Pulsierender Durchfluss durch Rohre. Forschung 11, 1940, Bd/H. 4.
- Лийв У. Р. О гидравлических закономерностях при ускоренном движении жидкости в напорном цилиндрическом трубопроводе. Тр. Таллинск. политехн. ин-та, Сер. А, 1965, № 223.
- Панчурин Н. А. Решение уравнения Навье — Стокса в частном случае нестационарного ламинарного течения в трубе и определение скоростей пограничного слоя. Тр. Ленингр. ин-та воды транспорта, 1963, вып. 35.
- Денисов С. В. О коэффициенте трения в нестационарных течениях. Инж. физ. ж., 1970, т. 18, № 1.
- Deemer K. C. Fluid friction due to unsteady flow in conduits. Massachusetts. Inst. Technology, 1952.
- Daily I. W., Hankey W. L., Olive R. W., Iordaan I. M. Resistance coefficients for accelerated and decelerated flow through smooth tubes and orificed. Tr. ASME, 1956, vol. 78, No. 5.
- Розовский И. Л., Еременко Е. В., Базилевич В. А. Неустойчившееся движение водного потока ниже гидроэлектростанций и его влияние на русло. Киев, «Наукова думка», 1967.
- Кудрявцев Е. П. Исследование пульсации давлений в нижнем бьефе ГЭС совмещенного типа, работающей в поверхностном режиме. Сб. «Строительство и архитектура», Изв. вузов, 1966, № 10.
- Чарный И. А. Влияние подводящей трубки на точность показаний манометра для регистрации пульсации давления. Изв. АН УССР, ОТН, 1946, № 3.
- Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М., «Наука», 1970.
- Бай Ш и -и. Турбулентное течение жидкостей и газов. М., Изд-во иностр. лит., 1962.
- Lauffer I. The structure of turbulence in fully developed pipe flow. N. A. C. A. T. R., 1954, p. 1174.
- Конт-Белло Ж. Турбулентное течение в канале с параллельными стенками. М., «Мир», 1968.
- Никитин И. К. Турбулентный русловой поток и процессы в придонной области. Киев, Изд-во АН УССР, 1963.
- Reichardt H. Messungen turbulenter Schwankungen. Die Naturwissenschaften, 1938, Nr 26.
- Никитин И. К. Двухслойная схема расчета турбулентного пограничного слоя на пластине с произвольной шероховатостью. В сб. «Исследование турбулентных одно- и двухфазных потоков», Киев, «Наукова думка», 1966.