

УДК 532.57:621.64

ОСРЕДНЕННЫЕ СКОРОСТИ ЖИДКОСТИ В ОКРЕСТНОСТИ ЦИЛИНДРА, ОБТЕКАЕМОГО ТУРБУЛЕНТНЫМ ПОТОКОМ В ОТКРЫТОМ КАНАЛЕ. ЭКСПЕРИМЕНТ

А. В. Чеботников

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск
E-mail: AVChebotnikov@gmail.com

Приведены результаты экспериментов, в которых круглый цилиндр, расположенный вблизи дна прямоугольного канала, обтекался в поперечном направлении статистически-стационарным турбулентным докритическим потоком со свободной поверхностью. С помощью PIV-метода получены данные о поле осредненной скорости в окрестности цилиндра. По градиентам продольной компоненты скорости определены касательные напряжения на дне канала. Показано, что наличие в потоке цилиндра приводит к появлению значительных вертикальных осредненных скоростей и существенному изменению касательных напряжений на дне канала.

Ключевые слова: поток со свободной поверхностью, поле скорости, круглый цилиндр, эксперимент, PIV-метод.

Введение. Исследованию обтекания цилиндра потоком несжимаемой жидкости посвящено большое количество как теоретических работ [1–4], так и экспериментальных [5, 6]. Ранее количественная информация о поле скоростей при больших числах Рейнольдса могла быть получена только с помощью термоанемометра на достаточно большом удалении от цилиндра вниз по потоку [3]. В том случае, если флуктуации скорости превышают среднюю скорость, а именно это имеет место в ближнем следе за цилиндром, термоанемометрический метод не позволяет выполнять измерения с достаточной точностью.

Ситуация существенно изменилась в 90-х гг. XX в. Развитие вычислительной техники и численных методов позволило выполнять прямое численное моделирование турбулентных течений при больших числах Рейнольдса, в экспериментах начал использоваться PIV-метод измерения скорости (particle image velocimetry), в котором отсутствует указанный недостаток термоанемометрического метода (см., например, [7, 8]).

Проведение лабораторных опытов, результаты которых представлены в данной работе, обусловлено необходимостью решения проблемы строительства и эксплуатации крупных трубопроводов, прокладываемых по дну реки. Наличие трубопровода может привести к изменению процессов выноса и отложения наносов, что в свою очередь изменит силовое воздействие потока на трубопровод. В отличие от работы [7] в экспериментах, описанных в настоящей работе, цилиндр располагался на относительно небольшом расстоянии от дна и меньше была степень загромождения потока цилиндром (отношение диаметра цилиндра к глубине набегающего потока).

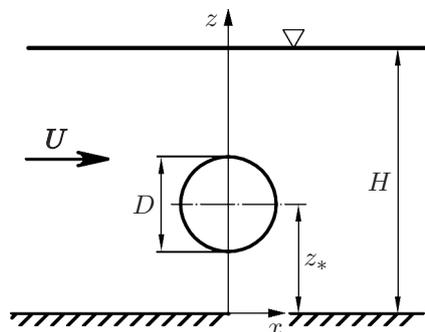


Рис. 1. Схема эксперимента

1. Методика эксперимента. Схема эксперимента приведена на рис. 1, там же показана неподвижная прямоугольная система координат. Перпендикулярно боковым стенкам прямоугольного канала шириной $B = 0,2$ м с горизонтальным дном располагался цилиндр диаметром $D = 0,028$ м на различных расстояниях z_* от его оси до дна. Цилиндр обтекался стационарным докритическим потоком воды с постоянным объемным расходом Q . Значения заданных параметров z_* (в метрах) и Q (в кубических метрах в секунду) изменялись от опыта к опыту в диапазонах $0 \leq z_* \leq 0,042$, $0,003 \leq Q \leq 0,006$. С помощью регулятора уровня свободной поверхности, расположенного на выходе из канала, во всех опытах глубина набегающего потока H поддерживалась постоянной и равной $0,12$ м. По расходу и глубине определялась среднерасходная скорость набегающего потока $U = Q/(BH)$.

Расход измерялся с помощью расходомера Вентури со среднеквадратичной погрешностью не более 2 %. Глубина H определялась с помощью мерных игл со среднеквадратичной погрешностью не более 1 %.

С использованием PIV-метода в продольной плоскости симметрии канала измерялись мгновенные значения продольной u и вертикальной w компонент скорости как функций x, z, t (t — время) и заданных параметров. Методика измерений с помощью PIV-метода изложена, например, в [9, 10]. Аппаратура фирмы DANTEC DYNAMICS, реализующая PIV-метод, настраивалась таким образом, чтобы можно было получить большое количество мгновенных картин поля скорости в продольной плоскости симметрии канала с интервалом времени между ними, равным $0,5$ с. Ниже приводятся экспериментальные данные, полученные осреднением значений скорости по 20 реализациям.

При анализе влияния трубопровода на режим транспорта наносов необходима информация о касательных напряжениях на дне канала. В данной работе изучалась только одна продольная компонента двумерного вектора осредненных касательных напряжений, действующих на дно канала. Эта величина определяется формулой

$$\langle \tau_w \rangle = \mu \left. \frac{d\langle u \rangle}{dz} \right|_{z=0},$$

где $\mu = \nu\rho$ — динамическая вязкость; ν — кинематическая вязкость; ρ — плотность жидкости; $\langle u \rangle$ — продольная компонента осредненной скорости.

PIV-метод не позволяет получить достаточно точную информацию непосредственно вблизи дна канала. В проведенных экспериментах наименьшее расстояние от дна δ , на котором удалось измерить скорости со среднеквадратичной погрешностью не более 2 %, составляло $3 \div 4$ мм. Поэтому при определении градиента скорости $(d\langle u \rangle/dz)|_{z=0}$ возникла необходимость экстраполяции измеренных профилей скорости на интервал $0 \leq z \leq \delta$. Для этого использовались данные о профиле скорости вблизи неподвижной твердой границы, приведенные в работе [11].

В случае течений в плоском пограничном слое, а также в круглой трубе и квадратном канале вид эмпирических формул для профиля скорости, в том числе вблизи стенки, зависит от числа Рейнольдса $Re = UH/\nu$, которое в проведенных опытах изменялось в диапазоне $1,66 \cdot 10^4 \leq Re \leq 2,85 \cdot 10^4$. При таких значениях Re в пограничном слое выделяются ламинарный подслой, переходная область и область развитой турбулентности, причем суммарная толщина ламинарного подслоя и переходной области $\delta_1 = 4,5 \div 10,0$ мм. При $z = \delta$ экспериментальные точки попадали в переходную область, расположенную между ламинарным подслоем и областью развитой турбулентности.

В переходной области скорость изменяется по координате z линейно. С учетом сказанного выше при определении касательных напряжений на дне канала осуществлялась линейная экстраполяция измеренных профилей скорости от значения $z = \delta$ до значения $z = 0$, при этом в качестве продольной компоненты касательного напряжения на дне принималась величина

$$\langle \tau_{we} \rangle = \frac{\mu}{\delta} \langle u \rangle \Big|_{z=\delta}.$$

Набегающий поток являлся статистически-стационарным. В размерном виде изучаемые функции $\langle u \rangle$, $\langle w \rangle$, $\langle \tau_{we} \rangle$ зависели, главным образом, от величин x , y , z , B , H , D , z_* , e , U , g , ν , ρ (e — высота выступов шероховатости на дне канала; g — ускорение свободного падения). Если при переходе к безразмерным величинам использовать характерные масштабы длины H и скорости U , то критериями геометрического и кинематического подобия рассматриваемой задачи будут следующие безразмерные величины:

$$B^0 = \frac{B}{H}, \quad D^0 = \frac{D}{H}, \quad z_*^0 = \frac{z_*}{H}, \quad e^0 = \frac{e}{H}, \quad Re = \frac{HU}{\nu}, \quad Fr = \frac{U^2}{gH}$$

(Re , Fr — критерии подобия Рейнольдса и Фруда).

В натуральных условиях значение критерия Рейнольдса большое и имеет место автомодельность течения по этому критерию. В выполненных опытах критерий Рейнольдса был несколько меньше, чем это необходимо для выполнения условия автомодельности. Однако с погрешностью, не превышающей 5 %, пересчет полученных экспериментальных данных на натурные условия можно выполнять по правилам гравитационного подобия, т. е. с соблюдением только геометрического подобия и подобия по критерию Фруда. С помощью PIV-метода была получена информация только в узкой окрестности продольной плоскости симметрии канала (в области значений поперечной координаты $y = (0 \pm 0,75)$ см). При указанных выше значениях B и H влиянием параметра B/H (боковых стенок канала) на течение в этой области можно пренебречь.

Далее координаты и искомые функции представляются в безразмерной форме

$$x^0 = \frac{x}{H}, \quad z^0 = \frac{z}{H}, \quad u^0 = \frac{\langle u \rangle}{U}, \quad w^0 = \frac{\langle w \rangle}{U}, \quad \delta^0 = \frac{\delta}{H},$$

$$\tau_{we}^0 = \frac{2\langle \tau_{we} \rangle}{\rho U^2} = \frac{2}{Re} \frac{du^0}{dz^0} \Big|_{z^0=0} \simeq \frac{2}{Re} \delta^0 u^0 \Big|_{z^0=\delta^0}.$$

В обозначениях безразмерных величин, полученных в результате осреднения по большому количеству реализаций, угловые скобки опущены.

2. Результаты эксперимента. В настоящей работе приводятся результаты трех серий экспериментов. В серии I цилиндр отсутствовал. В серии II цилиндр лежал на дне канала ($z_* = 0,5D$). В серии III между дном канала и цилиндром имелся зазор, равный диаметру цилиндра ($z_* = 1,5D$). В каждой серии задавался ряд значений среднерасходной скорости в диапазоне $0,14 \text{ м/с} \leq U \leq 0,24 \text{ м/с}$. Ниже приводятся в основном результаты, полученные при значениях $U = 0,14; 0,24 \text{ м/с}$ ($Re = 16\,600, 28\,500$ соответственно), а также

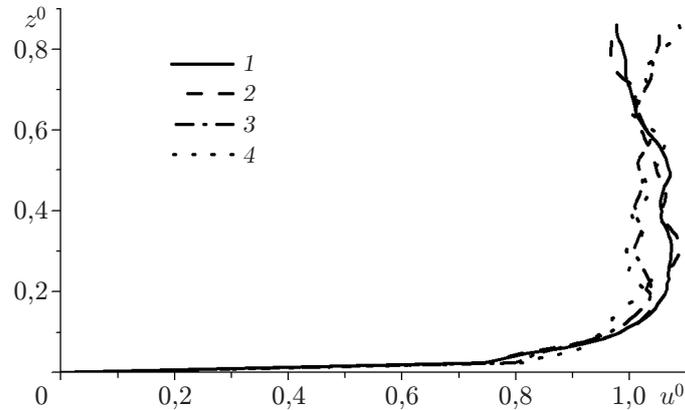


Рис. 2. Профили осредненной продольной компоненты скорости в отсутствие цилиндра ($H = 0,12$ м):

1 — $U = 0,14$ м/с; 2 — $U = 0,17$ м/с; 3 — $U = 0,21$ м/с; 4 — $U = 0,24$ м/с

экспериментальные данные, полученные при промежуточных значениях U . При пересчете с модельных условий на натурные по указанному выше правилу заданные параметры в выполненных опытах в масштабе 1 : 50 соответствовали параметрам натурального трубопровода диаметром 1,4 м, обтекаемого потоком глубиной 6 м со скоростями в диапазоне $1,00 \div 1,75$ м/с.

На рис. 2 приведены профили продольной компоненты скорости $u^0(z^0)$ в отсутствие цилиндра (серия I опытов). В этом случае вертикальная компонента осредненной скорости w^0 значительно меньше горизонтальной компоненты. Вид профилей $u^0(z^0)$, приведенных на рис. 2, характерен для переходного режима между режимом с гидравлически гладким дном и режимом с полным проявлением шероховатости дна канала. Для режима течения с полным проявлением шероховатости характерно то, что при достаточно больших значениях числа Рейнольдса толщина ламинарного подслоя становится существенно меньше высоты выступов шероховатости дна канала и происходит полное взаимодействие турбулентного потока с шероховатостью дна канала. В режиме с полным проявлением шероховатости вид профилей $u^0(z^0)$ не зависит от критерия Рейнольдса Re . Обнаруженное в опытах незначительное различие профилей при $Re = 1,66 \cdot 10^4$; $2,01 \cdot 10^4$; $2,49 \cdot 10^4$; $2,85 \cdot 10^4$ обусловлено, главным образом, влиянием свободной поверхности.

Наличие цилиндра приводит к существенному изменению картины течения. На рис. 3 приведены профили продольной компоненты скорости $u^0(z^0)$ в поперечном сечении канала $x^0 = 0$ при двух положениях оси цилиндра. Для сравнения приведен профиль, соответствующий случаю отсутствия цилиндра. Значения чисел Рейнольдса и Фруда равны $2,85 \cdot 10^4$ и 0,049 соответственно. При наличии цилиндра скорость на его поверхности равна нулю, а непосредственно за цилиндром образуется вихревая зона, вне которой скорость существенно увеличивается.

При исследовании задач транспорта наносов представляют интерес скорости потока вблизи дна. Данные, приведенные на рис. 3, показывают, что в случае наличия зазора под цилиндром, равного D (кривая 3 на рис. 3), при $z^0 = \delta^0$ скорость увеличилась в 1,7 раза по сравнению со случаем отсутствия цилиндра (кривая 1 на рис. 3). В случае размываемого дна увеличение придонной скорости приводит к более интенсивному выносу наносов. В случае отсутствия зазора (кривая 2 на рис. 3) за цилиндром образуются статистически-стационарный вихрь и застойная зона, в которой может происходить отложение наносов.

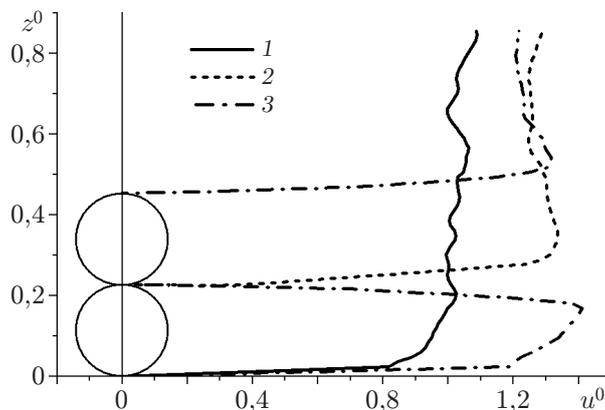


Рис. 3. Профили продольной компоненты скорости при различных положениях цилиндра ($H = 0,12$ м, $U = 0,24$ м/с, $x^0 = 0$):
 1 — в отсутствие цилиндра; 2 — $z_* = 0,5D$; 3 — $z_* = 1,5D$

Наличие цилиндра приводит существенному изменению поля скорости не только ниже по потоку, но и на некотором расстоянии от цилиндра выше по потоку. Профили продольной компоненты $u^0(z^0)$, полученные при различных значениях x^0 и U , приведены на рис. 4, а, б (серия II опытов) и рис. 4, в, г (серия III опытов).

Анализ данных, приведенных на рис. 4, показывает, что при наличии цилиндра уменьшение продольной компоненты скорости по сравнению с ее значением в отсутствие цилиндра имеет место не только в следе за цилиндром, но и перед цилиндром в некотором интервале в окрестности $z^0 = z_*^0$. Ширина этого интервала на $25 \div 30$ % больше диаметра цилиндра. Продольный размер области, в которой влияние цилиндра проявляется вверх по потоку, зависит от степени загромождения потока цилиндром, характеризуемой параметром D^0 . Загромождение потока существенно влияет также на форму гидродинамического следа за цилиндром. На внешней границе следа скорости оказываются больше, чем в набегающем потоке. Согласно данным, приведенным на рис. 4, в отдельных точках потока абсолютное значение продольной компоненты осредненной скорости превышает среднерасходную скорость примерно в 1,5 раза.

Следует отметить, что в следе за цилиндром на небольших расстояниях от него в отдельных точках потока компонента u^0 скорости может быть отрицательной (кривые 1–3 на рис. 4). Поскольку измерения термоанемометром выполнялись только за цилиндром на достаточно большом расстоянии от него, наличие отрицательных скоростей в следе за цилиндром ранее не обнаруживалось. Эта особенность течения в ближнем следе, выявляемая PIV-методом, обусловлена влиянием крупных вихрей, отрывающихся от цилиндра.

При наличии достаточно большого зазора между цилиндром и дном канала, а также между цилиндром и свободной поверхностью структура вихревого движения в ближнем следе за цилиндром аналогична структуре, наблюдающейся при обтекании цилиндра безграничным потоком [11]. В случае безграничного набегающего потока вместо введенного выше критерия Re применяется критерий $Re_1 = UD/\nu = D^0 Re$, в котором в качестве характерного линейного размера используется диаметр цилиндра. В диапазоне $60 < Re_1 < 5000$ за цилиндром на некотором расстоянии от него существует упорядоченная структура вихрей, известная как вихревая дорожка Кармана [2, 6]. В вихревой дорожке вихри за цилиндром поочередно отрываются от него то с одной стороны, то с другой.

Даже в указанном диапазоне значений Re_1 “классическая” вихревая дорожка за цилиндром устойчива лишь на ограниченном расстоянии от него. С увеличением Re_1 интенсифи-

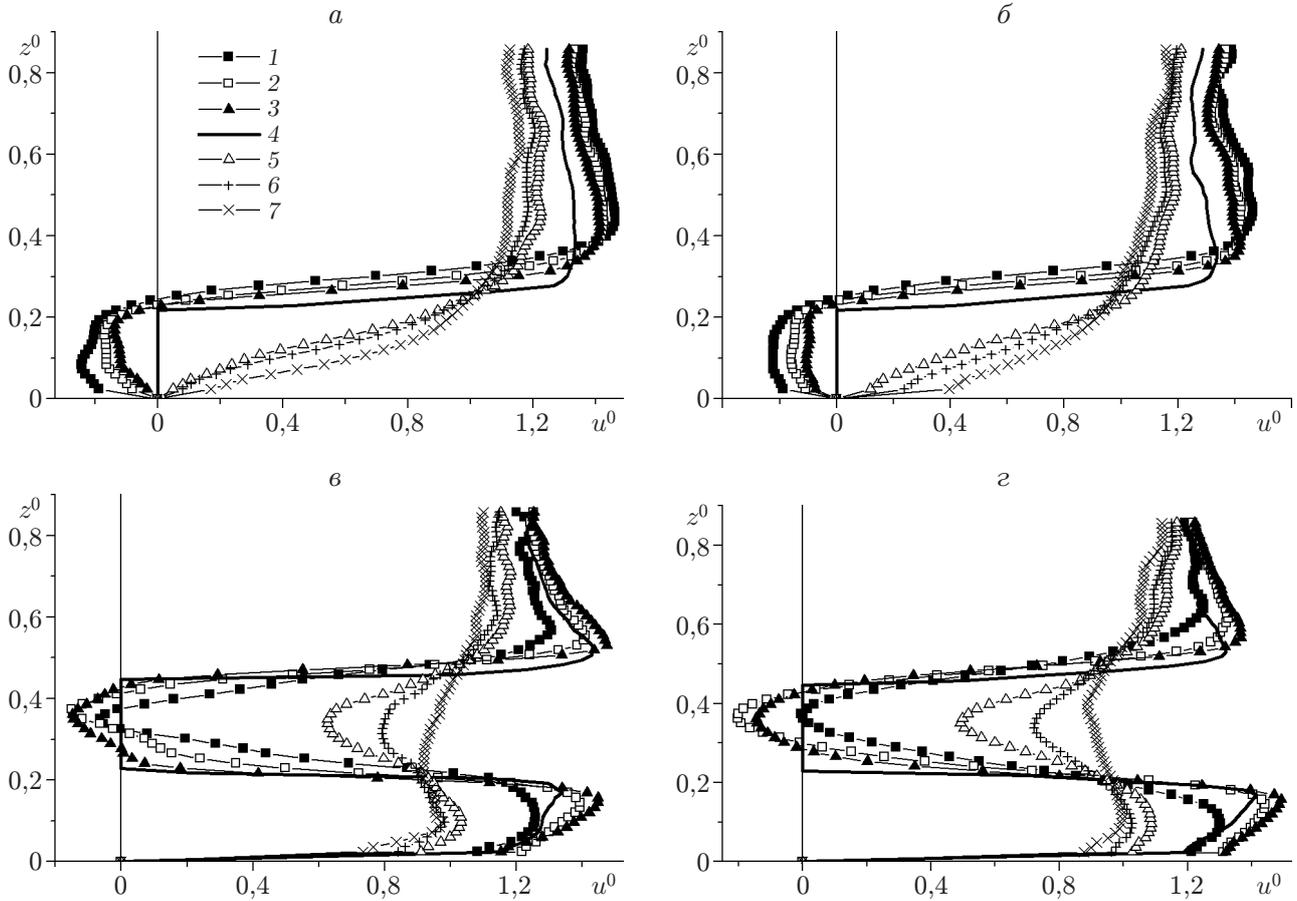


Рис. 4. Профили продольной компоненты скорости в различных поперечных сечениях при $z_* = 0,5D$ (а, б) и $z_* = 1,5D$ (в, г) для $H = 0,12$ м:
 а, в — $U = 0,14$ м/с, б, г — $U = 0,24$ м/с; 1 — $x^0 = 0,35$; 2 — $x^0 = 0,23$; 3 — $x^0 = 0,175$;
 4 — $x^0 = 0$; 5 — $x^0 = -0,175$; 6 — $x^0 = -0,23$; 7 — $x^0 = -0,35$

ность процесса разрушения возрастает и гидродинамический след за цилиндром даже на небольшом расстоянии от него становится турбулентным. В выполненных опытах задавались значения Re_1 в диапазоне $3870 \leq Re_1 \leq 6650$, т. е. эти значения либо соответствовали интервалу значений Re_1 , при которых существует “классическая” вихревая дорожка Кармана, либо незначительно выходили за верхнюю границу этого интервала.

Несмотря на то что вихри по одну сторону от цилиндра существуют только периодически, при осреднении для достаточно большого промежутка времени картина линий тока в ближнем следе имеет такой вид, как будто за цилиндром имеется два стационарных вихря, вращающихся в противоположных направлениях. При этом в области каждого из этих вихрей, примыкающей к горизонтальной плоскости симметрии цилиндра, осредненная скорость направлена к цилиндру. При достаточно больших значениях x^0 осредненная скорость в следе меньше скорости вне следа, но совпадает с ней по направлению.

Вертикальная компонента скорости существенно влияет на гидродинамическое давление на дне канала и транспорт наносов. Как отмечено выше, в отсутствие цилиндра вертикальная компонента осредненной скорости в равномерном потоке равна нулю. При наличии цилиндра эта компонента скорости отлична от нуля, причем она может быть как положительной (направленной вверх), так и отрицательной. Профили вертикальной компоненты скорости $w^0(z^0)$, полученные в сериях II и III опытов, приведены на рис. 5. В случае отсутствия зазора (см. рис. 5, а, б) осредненная вертикальная скорость перед ци-

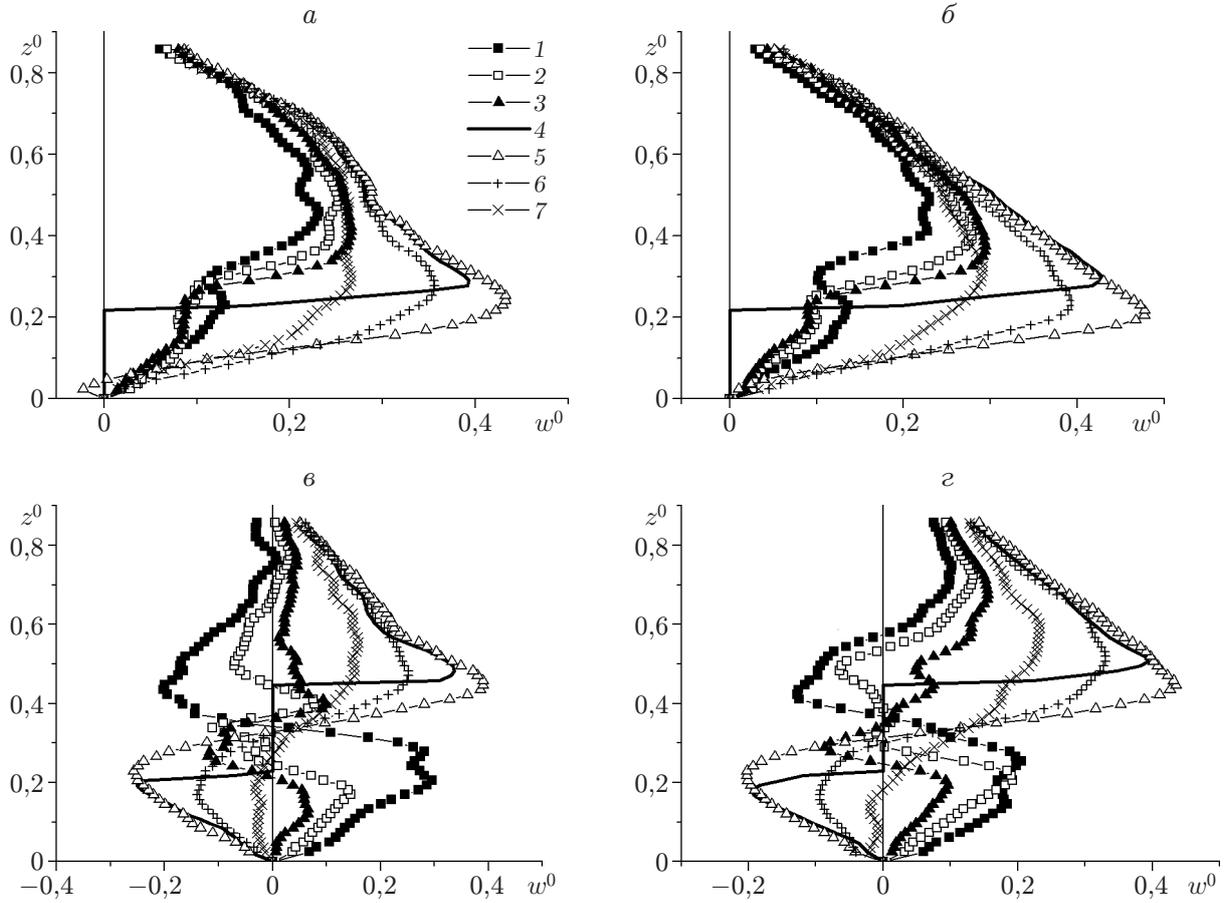


Рис. 5. Профили вертикальной компоненты скорости в различных поперечных сечениях при $z_* = 0,5D$ (а, б) и $z_* = 1,5D$ (в, г) для $H = 0,12$ м (обозначения те же, что на рис. 4)

линдром направлена вверх, а за цилиндром на некотором расстоянии от него — вниз. При наличии зазора (см. рис. 5, в, г) вблизи цилиндра происходит разделение потока на два слоя на расстоянии от дна, соответствующем вертикальной координате оси цилиндра. Нижний слой устремляется в зазор, и скорость w^0 в нем становится отрицательной. Верхний слой отклоняется вверх, и скорость w^0 в нем становится положительной. За цилиндром происходит расширение слоев, и скорость w^0 в каждом из них изменяет знак.

По абсолютной величине значение компоненты w скорости в отдельных точках потока в окрестности цилиндра может достигать 45 % значения U . Следует отметить также, что в окрестности цилиндра вертикальная компонента скорости порождает волны на свободной поверхности, которые также могут влиять на процесс транспорта наносов на больших расстояниях от цилиндра вниз по потоку.

Существенное влияние на процесс размыва оказывают касательные напряжения на дне канала $\tau_{we}^0(x^0)$. Экспериментальные данные о касательных напряжениях на дне в отсутствие цилиндра представлены на рис. 6, а, при наличии цилиндра — на рис. 6, б (серия II опытов) и рис. 6, в (серия III опытов).

В равномерном стационарном потоке касательные напряжения в отсутствие цилиндра не должны изменяться по длине канала. В выполненных опытах имела место слабая зависимость τ_{we}^0 от x^0 (кривые 3, 4 на рис. 6, а). Это обусловлено влиянием ограниченной длины канала. На тех расстояниях от входа в канал, где выполнялись измерения, течение было еще слабонервномерным.

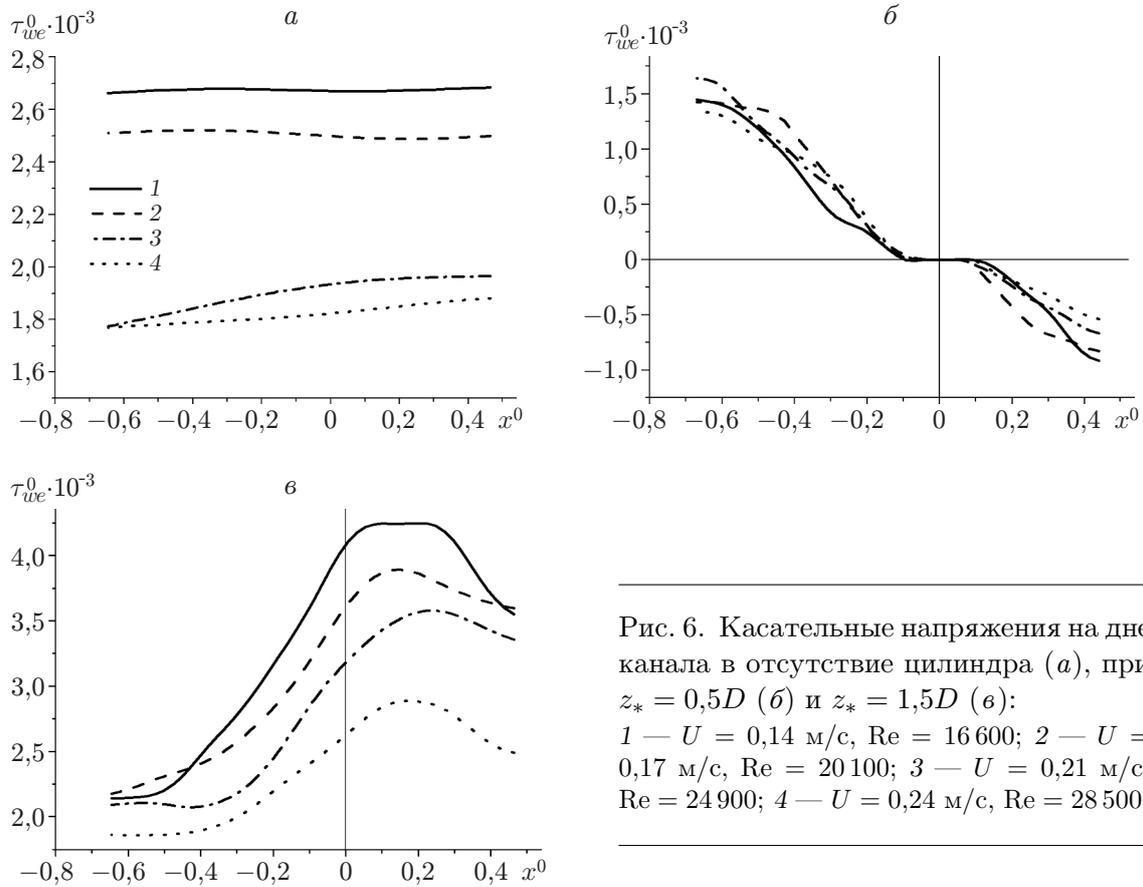


Рис. 6. Касательные напряжения на дне канала в отсутствие цилиндра (*a*), при $z_* = 0,5D$ (*б*) и $z_* = 1,5D$ (*в*):
 1 — $U = 0,14$ м/с, $Re = 16\,600$; 2 — $U = 0,17$ м/с, $Re = 20\,100$; 3 — $U = 0,21$ м/с, $Re = 24\,900$; 4 — $U = 0,24$ м/с, $Re = 28\,500$

Следует отметить, что даже в отсутствие цилиндра имела место зависимость безразмерных касательных напряжений на дне от критерия Re , причем эта зависимость немонотонная. В интервале $20\,100 \leq Re \leq 24\,900$ безразмерные касательные напряжения в отсутствие цилиндра уменьшаются примерно в 1,3 раза. Это обусловлено тем, что опыты проводились в переходном режиме между режимом течения с гидравлически гладкой стенкой и режимом с полным проявлением шероховатости стенки.

При наличии цилиндра касательные напряжения в его окрестности существенно изменяются. Если зазор между цилиндром и дном отсутствует (см. рис. 6, *б*), то касательные напряжения непосредственно перед цилиндром уменьшаются, а за ним принимают отрицательные значения. Это обусловлено тем, что при отрыве потока от цилиндра образуется крупный вихрь с возвратным течением вблизи дна. При наличии зазора (см. рис. 6, *в*) значения действующих на дно касательных напряжений являются всюду положительными и существенно превышают соответствующие значения в отсутствие цилиндра.

Наиболее существенное превышение имеет место на расстоянии от оси цилиндра вниз по потоку, приближенно равном диаметру цилиндра. В рассмотренном диапазоне значений Re наиболее значительное превышение зависело от числа Рейнольдса и составляло $55 \div 75$ % касательных напряжений в равномерном потоке. Следует ожидать, что в режиме с полным проявлением шероховатости дна (в области квадратичной зависимости касательных напряжений от скорости набегающего потока) наиболее существенное превышение напряжения (безразмерное) не зависит от Re и составляет примерно 50 % касательных напряжений в равномерном потоке.

Заключение. Результаты проведенного исследования показали, что наличие цилиндра приводит к значительному изменению поля скорости в потоке со свободной поверхностью. В окрестности цилиндра появляется значительная вертикальная компонента осредненной скорости, которая может быть как положительной (направленной вверх), так и отрицательной, что оказывает существенное влияние на размыв дна. В одном из выполненных опытов эта компонента скорости по абсолютной величине составляла 45 % среднерасходной скорости. В случае отсутствия зазора между цилиндром и дном канала на дне за цилиндром образуется зона возвратного течения. Такая же зона, но на некотором расстоянии от дна имеет место в случае наличия зазора.

В окрестности цилиндра существенно изменяются также касательные напряжения, действующие на дно канала. Наиболее неблагоприятная ситуация (вынос наносов с размываемого дна) имеет место при наличии зазора между цилиндром и дном канала. В одном из выполненных опытов на расстоянии от оси цилиндра вниз по потоку безразмерные касательные напряжения на дне увеличились на 75 % по сравнению со значениями, имевшими место в отсутствие цилиндра. Размерные касательные напряжения пропорциональны квадрату средней скорости набегающего потока, а критическое значение скорости, при котором начинается размыв, зависит только от структуры материала дна. Следовательно, размыв дна в окрестности цилиндра может начаться при существенно меньшей скорости набегающего потока, чем в отсутствие цилиндра.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Strouhal V.** Über eine besondere Art der Tonerregung // Ann. Phys. Chem. 1878. V. 5. P. 216–251.
2. **Karman Th. von.** Über den Mechanismus des Widerstandes, den ein bewegter Körper in einer Flüssigkeit erfährt // Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse. Berlin: Weidmannsche Buchhandlung, 1911. P. 509–517.
3. **Таунсенд А. А.** Структура турбулентного потока с поперечным сдвигом. М.: Изд-во иностр. лит., 1959.
4. **Прандтль Л.** Гидроаэромеханика. М.: Изд-во иностр. лит., 1951.
5. **Ван Дайк М.** Альбом течений жидкости и газа. М.: Мир, 1986.
6. **Williamson C. H. K.** Vortex dynamics in the cylinder wake // Annual Rev. Fluid Mech. 1996. V. 28. P. 477–539.
7. **Sheridan J., Lin J. C., Rockwell D.** Flow past a cylinder close to a free surface // J. Fluid Mech. 1997. V. 330. P. 1–30.
8. **Reichl P., Hourigan K., Thompson M. C.** Flow past a cylinder close to a free surface // J. Fluid Mech. 2005. V. 533. P. 269–296.
9. **Flow manger software and introduction to PIV instrumentation: Software user's guide.** Skovlunde: Dantec Dynamics A/S, 2002.
10. **Willert C. E., Gharib M.** Digital particle image velocimetry // Exp. Fluids. 1991. V. 10, N 4. P. 181–193.
11. **Дейли Дж.** Механика жидкости / Дж. Дейли, Д. Харлеман. М.: Энергия, 1971.

Поступила в редакцию 28/III 2012 г.