$$\sum_{k=1}^{n} (-4 + d_k - x_k \partial_k) S_n (x_1 \ldots x_n) = 0. \tag{5}$$

Конформная инвариантность теории означает, что

$$[S, K_\mu] = 0. \tag{6}$$

Из соотношений (2) и (6) следует уравнение конформной инвариантности для $S_n(x_1 \ldots x_n)$:

$$\sum_{k=1}^{n} (2(4 - d_k) x_{k\mu} + 2x_{k\mu} x_{k\nu} \partial_k^\nu - x_k^2 \partial_{k\mu} + \\ + 2i x_k^\nu \Sigma_{\mu\nu}) S_n (x_1 \ldots x_n) = 0. \tag{7}$$

В аксиоматике Боголюбова оператор тока определяется как

$$I(x) = iS^+ \frac{\delta S}{\delta \varphi(x)}. \tag{8}$$

Из определения оператора $I(x)$ следует, что в масштабно-инвариантной теории оператор тока имеет каноническую размерность, т. е. размерность $I(x)$ равна 3, если $\varphi(x)$ — скаляр или вектор. Отсюда, в частности, следует, что размерность оператора электромагнитного тока $I_\mu(x) = iS^+ \frac{\delta S}{\delta A^\mu(x)}$ равна 3, что соответствует экспериментально наблюдаемому точечноподобному поведению форм-факторов в глубоконеупругом рассеянии электронов на нуклонах [5].

В заключение подчеркнем, что в отличие от аксиоматики Вайтмана, где оператор тока I_μ в принципе может иметь любую размерность, в аксиоматике Боголюбова оператор тока может иметь только каноническую размерность. Это обстоятельство является указанием на то, что оператор электромагнитного тока должен иметь каноническую размерность.

Автор благодарен В. А. Матвееву, А. Н. Тавхелидзе и К. Г. Четыркину за ценные замечания и дополнения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kastrap H. A. «Phys. Rev.», **142**, 1060, 1966.
2. Mack G., Salam A. «Ann. Phys.», **53**, 174, 1969.
3. Mack G. «Nucl. Phys.», **135**, 499, 1968.
4. Mack G., Todorov I. T. Trieste preprinte **1C**, 139, 1971.
5. Carruthers P. «Phys. Lett», **1C**, 4, 1971.
6. Дао Вонг Дык. Препринт ОИЯИ, Р2—6979. Дубна, 1973.
7. Боголюбов Н. Н., Логунов А. А., Тодоров И. Т. Основы аксиоматического подхода в квантовой теории поля. М., 1969.

Поступила в редакцию
26.11 1974 г.

Кафедра
квантовой статистики

УДК 551.465

Л. А. БУКИНА, Н. К. ШЕЛКОВНИКОВ

К РАСПРЕДЕЛЕНИЮ СКОРОСТИ В ПОТОКЕ ЖИДКОСТИ СО СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Распределение скорости потока жидкости у гладких и шероховатых стенок над пластинками, в трубах и каналах уже исследовалось [1, 2, 3]. Большой научный интерес к проблеме взаимодействия движущейся жидкости с твердыми поверхностями обусловлен огромной технической важностью этого вопроса. Однако не мень-

шее значение имеет проблема взаимодействия движущейся жидкости с приводным слоем воздуха. Несмотря на различные граничные условия у дна и свободной поверхности жидкости, в обоих случаях имеет место изменение скорости потока на границе раздела. Естественно, что силы трения на этих границах различны, так как верхняя граница является менее плотной и способной к перемещению. Чем больше скорость движения жидкости, тем больше взаимодействие в пограничном слое. Очевидно, если на верхней границе раздела поток воздуха будет направлен в противоположную сторону, чем поток жидкости, то взаимодействие также возрастет.

В данной работе исследуется это явление в лабораторных условиях и, кроме того, определяется величина изменения скорости жидкости у границы раздела вода — воздух при невозмущенном воздухе и при искусственно создаваемом ветре, направленном вдоль и против потока жидкости.

Опыты проводились на методическом лотке прямоугольной формы размером 20×40×700 см при угле уклона 0,003. Измерения вертикального распределения скорости в потоке как при гладком, так и при шероховатом дне проводились с помощью микровертушки типа Х-6. Шероховатость на дне лотка создавалась нанесением гравия диаметром 6—8 мм на стеклянную основу. Число Рейнольдса составляло ~50 000. Измерения скорости проводились на расстоянии 10 H от входного устройства лотка в осевой его части (H — общая глубина потока). Определение вертикального профиля течения осуществлялось в пределах $0{,}04 \leqslant \eta = \frac{h}{H} \leqslant 0{,}96$ при общей глубине потока ~25 см (h — глубина потока в точке измерения).

Вертикальные профили течения, измеренные над гладким и шероховатым дном в области $0{,}04 \leqslant \eta \leqslant 0{,}71$, приведены на рис. 1, кривые *1* и *2*. Сравнение их показывает, что на глубинах $\eta \geqslant 0{,}3$ скорости потока, измеренные при гладком и шероховатом дне, практически совпадают. На глубинах $\eta < 0{,}3$ наблюдается некоторое расхождение в величинах скорости, очевидно, вследствие влияния шероховатости. На этом же рисунке (кривая *3*) дан профиль скоростей при меньшей средней скорости потока на глубинах $0{,}04 \leqslant \eta \leqslant 0{,}98$. Как видно из этой кривой, на глубинах $0{,}04 \leqslant \eta \leqslant 0{,}5$ скорость потока изменяется по логарифмическому закону. Только в самом приповерхностном слое наблюдается резкое отклонение эпюры скорости от логарифмического закона в сторону уменьшения скорости при приближении к поверхности потока. (Заметное отклонение профиля скорости от логарифмического наблюдается в слое $\eta \geqslant 0{,}8$.) Таким образом, для определения величины уменьшения скорости течения в самом приповерхностном слое можно использовать данные не только над гладким, но и над шероховатым дном.

На рис. 2 приведены профили скоростей, захватывающие приповерхностные слои жидкости на глубинах $0{,}3 \leqslant \eta \leqslant 0{,}96$. Для удобства анализа масштаб $\ln h$ по сравнению с рис. 1 здесь увеличен в 4 раза.

Из рис. 2 видно, что в приповерхностном слое величины скорости не укладываются в основной логарифмический профиль. В слое $\eta \geqslant 0{,}8$ происходит смена знака градиента скорости, и в самом приповерхностном слое скорость течения с глубиной уменьшается.

Из рисунка также видно, что с увеличением скорости движения жидкости становятся сильнее изменения в величине скорости в приповерхностном слое (см. рис. 2). Это можно объяснить следующим образом. Во-первых, при увеличении скорости потока улучшается взаимодействие между границей вода — воздух за счет увеличения ряби. Возрастание ряби на поверхности движущейся жидкости равносильно увеличению шероховатости, что приводит к более сильному искривлению профиля скорости. Во-вторых, увеличивается перепад скоростей между воздухом и водой. Измерение вертикального профиля в лотке делалось Никитиным [4] и Минским [5]. Однако в их работах не было сказано об уменьшении скорости течения в приповерхностном слое, очевидно, потому, что исследования были ограничены областью $0{,}2 \leqslant \eta \leqslant 0{,}8$ при малых средних скоростях потока.

Нужно отметить еще одну особенность, которая выявляется на рис. 2. Если не рассматривать переходную область, где меняется знак градиента скорости, то в приповерхностном слое профиль скорости также будет следовать логарифмическому закону, но с другими коэффициентами, чем в нижележащих слоях. Особенно наглядно это показано на кривых *2* и *3* (где профиль скорости в полулогарифмических координатах укладывается в прямую).

Чтобы выяснить роль воздушного потока в формировании приповерхностного скоростного поля потока, над движущейся поверхностью воды создавался поток воздуха в направлении, совпадающем с направлением движения воды в лотке и в противоположном. Результаты этих измерений приведены на рис. 2 (кривые *4* и *5*). Как видно из этих кривых, при совпадении направлений потоков жидкости и воздуха эффекты уменьшения скорости менее заметны, чем в отсутствии потока воздуха (кривые *3* и *4*). В последнем случае на высоте $\eta = 0{,}94$ наблюдается отклонение профиля скорости от основной логарифмики. При ветре, совпадающем с направлением дви-

жения воды, изменения скорости на той же высоте еще не происходит. К сожалению, в этом случае на глубинах $\eta > 0{,}94$ данных о величине скорости потока не было получено.

В случае же, когда потоки были встречными, эффект уменьшения скорости в поверхностном слое воды был ярче по сравнению с эффектом уменьшения скорости в отсутствии ветра (кривые *4* и *5*). Таким образом в случае, когда поток воздуха был направлен против течения жидкости, создавалось дополнительное торможение, усиливающее искривление профиля скорости.

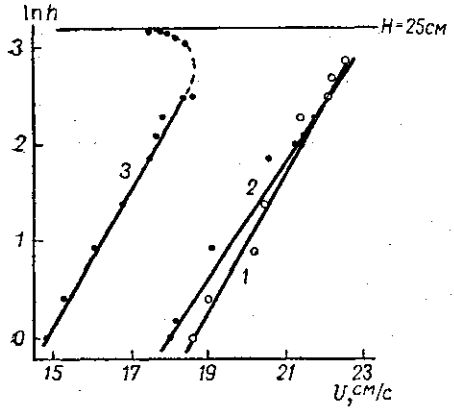

Рис. 1. Вертикальные профили осредненной скорости течения при гладком (кривая *1*) и шероховатом дне (кривые *2* и *3*)

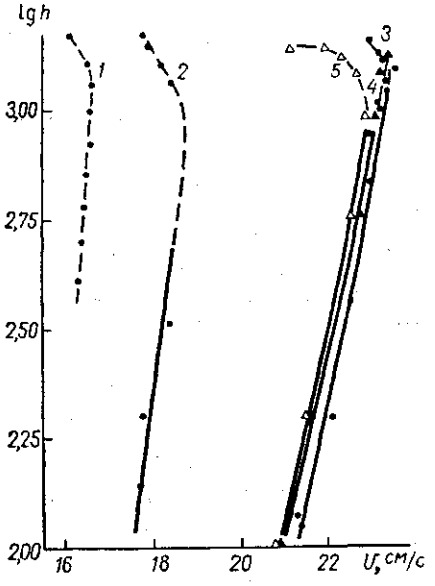

Рис. 2. Осредненные скорости течения при наличии искусственно создаваемого потока воздуха. Кривые *1*, *2* и *3* — в отсутствии ветра, *4*—при наличии ветра в продольном направлении, *5* — при наличии ветра навстречу движения воды (*1* при $H=25{,}5$; *2* — $H=24{,}5$; *3* и *4*=24,2 и *5* — при $H=23{,}8$ см)

Из всего изложенного можно сделать вывод, что в приповерхностном слое воды происходит искажение логарифмического профиля скорости (с изменением знака градиента скорости) и тем сильнее, чем больше скорость движения жидкости. Искажение также увеличивается, если навстречу потоку жидкости направлен встречный поток воздуха, который должен сильнее изменять структуру турбулентности в пограничном слое воды. Очевидно, в таком случае в пограничном слое воды необходимо учитывать взаимодействие воды с потоком воздуха.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хинце И. О. Турбулентность. М., 1963.
2. Монин А. С., Яглом А. М. Статистическая гидромеханика, ч. I. М., 1965.
3. Конт-Белло Ж. Турбулентные течения в канале с параллельными стенками. М., 1968.
4. Никитин И. К. Турбулентный русловой поток и процессы в придонной области. Киев, 1963.
5. Минский Е. М. Турбулентность руслового потока. М., 1952.

Поступила в редакцию
11.12 1974 г.

Кафедра
физики моря и вод суши