

ГИДРОДИНАМИКА

О. К. БЛУМБЕРГ

**К ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМУ ИЗУЧЕНИЮ ТУРБУЛЕНТНОСТИ
РЕАЛЬНЫХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ**

(Представлено академиком О. Ю. Шмидтом 16 V 1938)

Турбулентность естественных водотоков и водоемов почти не изучена. Большая часть работ, посвященных этому вопросу, делает выводы на основе косвенных методов, в частности наблюдениях за расслоением температуры, солености и т. д. Сравнительно реже для определения турбулентности употребляются вертушечные наблюдения с хронографической записью, при этом обычно фиксируется только одна продольная составляющая скорости $v \cos \beta \cos \gamma$, где v — скаляр скорости, а β и γ — углы, соответственно составленные вектором скорости с вертикальной или горизонтальной плоскостью, проходящей через динамическую ось. Реже записываются вариации угла β , например, вертушкой Экман-Мерца, дающей размеры боковой составляющей течения $v \sin \beta \cos \gamma$. Для определения вертикальной составляющей $v \sin \gamma$ существующие вертушки, кроме единичных моделей, неприменимы ⁽¹⁾, и эта крайне важная для практических задач по насосам, донному льду и т. д. величина остается до сего времени почти неисследованной.

Разработанный автором в 1933 г. метод определения скоростей при помощи красочных облаков ⁽²⁾ позволяет определить также и величину турбулентности естественных русел. При мгновенном и безнапорном пуске краски в воду, достигаемом при помощи специального пускателя, в воде образуется красочное облако формы эллипсоида вращения, растущее во времени и смещающееся по течению. Наблюдения за максимальными размерами облака по трем осям $2R_{\text{прод.}}$, $2R_{\text{бок.}}$ и $2R_{\text{верт.}}$ позволяют определить не только углы β и γ по формулам $R_{\text{верт.}} = 2vT \sin \gamma_{\text{max}}$ и $R_{\text{бок.}} = 2vT \sin \beta_{\text{max}}$, но и отделить эффект вариации углов от вариаций самого скаляра скорости, решив таким образом один из коренных вопросов речной гидравлики.

Если признать возможными эти последние добавки к средней величине скаляра $\pm \epsilon$, то получим (фиг. 1) следующие приближенные формулы (в предположении равенства углов β и γ):

$$\Delta x = (v_{\text{max}} - v_{\text{min}} \cos^2 \beta) T,$$

$$\frac{\Delta y}{2v_{\text{max}}} = T \sin \beta,$$

$$\frac{\Delta x}{\Delta y} = \frac{1}{2 \sin \beta} - \frac{v_{\text{min}}}{v_{\text{max}}} \frac{\cos^2 \beta}{2 \sin \beta},$$

откуда

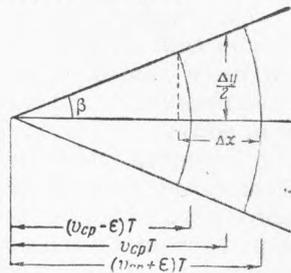
$$\frac{v_{\text{ср.}} - \varepsilon}{v_{\text{ср.}} + \varepsilon} = \frac{1 - \frac{\Delta x}{\Delta y} 2 \sin \beta}{\cos^2 \beta}.$$

Те же характеристики могут быть получены из наблюдений за красочным паводком, т. е. за хронологической картиной изменения концентрации в точке, избранной на оси потока. Из тех же соображений, что в первом случае, получаем (фиг. 2):

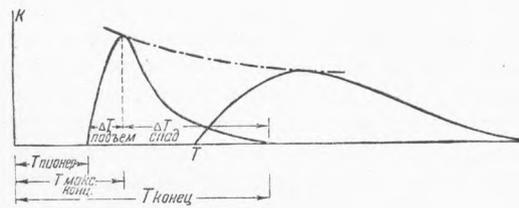
$$\Delta T_{\text{подъем}} = T_{\text{макс. конц.}} - T_{\text{пионер}} = \frac{L'}{v_{\text{ср.}}} - \frac{L}{v_{\text{ср.}} + \varepsilon} = \frac{\varepsilon L}{v_{\text{ср.}}(v_{\text{ср.}} + \varepsilon)} = \varepsilon,$$

$$\frac{\Delta T_{\text{подъем}}}{T_{\text{макс. конц.}}} = \frac{\varepsilon}{v_{\text{max}}}; \quad \cos^2 \beta = \frac{1 - \frac{\Delta T_{\text{спад}}}{T_{\text{конец}}}}{1 - \frac{\Delta T_{\text{подъем}}}{T_{\text{пионер}}}}.$$

Наблюдение за снижением максимальной концентрации красочных паводков на двух последовательных створах, изображающихся гипербо-



Фиг. 1.



Фиг. 2.

лой высших степеней $K_{\text{max}} = \frac{C}{(P + SL)^m}$, дает возможность через зависимость $R = bL^n$ более точно определить турбулентность, т. е. характер и распределение углов β и γ в свойственных им максимальных пределах. Переход от этих углов к размерам общераспространенной характеристики турбулентности — коэффициента турбулентного обмена — может быть сделан при помощи приближенной формулы автора:

$$A = \frac{K_{\text{ср.}}}{K_{\text{max}}} \cdot \frac{R^2}{3T}.$$

Не менее наглядное освещение всех вариаций вектора скорости, при этом в двух плоскостях, может быть получено применением следующего почти бесприборного метода.

Заготавливается песок определенной (и довольно значительной) гидравлической крупности для данной продольной скорости течения, путем просеивания через два параллельных грохота с отверстиями надлежащих размеров. Намечается место вертикали по возможности с наличием небольшого участка ровного и горизонтального дна на протяжении 2—4 м в продольном и 1—2 м в боковом направлении. Просеянный песок высыпается в поток через воронку в сухом виде или в виде полужидкой смеси с водой. Попав в воду, песчинки начинают принимать участие в движениях соответствующих частиц воды, описывая слож-

ные траектории, но неизменно сохраняя свое вертикальное движение вниз, согласно своей гидравлической крупности u . Первой упадет на дно та песчинка, которая на протяжении всей вертикали имела вертикальную составляющую, направленную вниз и равную максимальной возможной величине ее $w_{\max} = (v \sin \gamma)_{\max}$, прибавляющуюся к u ; последней — та, значение вертикальной составляющей которой все время равно — w_{\max} .

Поскольку для вариации углов β и γ установлен симметричный закон случайности, главная масса песка будет соответствовать равенству: $\sum +w_{\max} = \sum -w_{\max}$ и будет опускаться на дно со скоростью u . Таким образом в первом приближении получим для времен осаждения:

$$T_{\text{пионер}} = \frac{H}{u + w_{\max}}, \text{ а для соответствующих расстояний } L_{\text{пионер}} = \frac{Hv}{u + w_{\max}};$$

$$T_{\text{макс. конц.}} = \frac{H}{u} \qquad L_{\text{макс. конц.}} = \frac{Hv}{u};$$

$$T_{\text{конец}} = \frac{H}{u - w_{\max}}, \text{ если } u > w_{\max} \qquad L_{\text{конец}} = \frac{Hv}{u - w_{\max}};$$

$$T_{\text{конец}} = \infty, \qquad \text{если } u < w_{\max} \qquad L_{\text{конец}} = \infty.$$

Отсюда можно определить как среднюю продольную скорость

$$v = \frac{L_{\text{макс. конц.}}}{T_{\text{макс. конц.}}} = \frac{L_{\text{макс. конц.}} u}{H},$$

так и относительную величину максимальной вертикальной составляющей по формулам:

$$\Delta L_{\text{подъем}} = L_{\text{макс. конц.}} - L_{\text{пионер}} = Hv \left(\frac{1}{u} - \frac{1}{u + w_{\max}} \right);$$

$$\Delta L_{\text{спад}} = L_{\text{конец}} - L_{\text{макс. конц.}} = Hv \left(\frac{1}{u - w_{\max}} - \frac{1}{u} \right);$$

$$\frac{\Delta L_{\text{подъем}}}{\Delta L_{\text{спад}}} = \frac{u - w_{\max}}{u + w_{\max}} = \frac{1 - \frac{w_{\max}}{u}}{1 + \frac{w_{\max}}{u}} = f \left(\frac{w_{\max}}{u} \right).$$

Таким образом форма грядки характеризует $\frac{w_{\max}}{u}$ и само w_{\max} , поскольку u известно.

Наличие боковой составляющей течения сказывается на форме грядки боковой протяженностью ее сторон. Размер этой последней для точки, отвечающей максимальной концентрации песка, т. е. наибольшей высоте грядки, дает возможность определить угол β по формуле $L_{\text{бок.}} = v \sin \beta$.

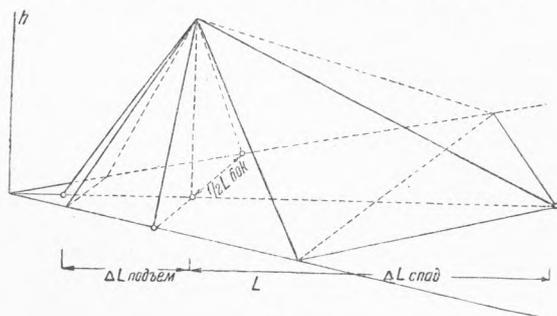
Итак, для нахождения всех трех составляющих течения достаточно знать местонахождение в плане пяти точек по отношению к проекции места пуска (фиг. 3), соответствующих крайним точкам попадания песка и месту максимальной высоты грядки.

Метод можно распространить и на случай, когда конец грядки отодвигается в бесконечность; в этом случае отношение $\frac{w_{\max}}{u}$ может быть

получено по характеру подъема и снижения высоты грядки близ точки перегиба.

При работах на малых глубинах нужные точки засекаются визуально или при помощи вертикальной трубы при соответствующем освещении. При глубинах, больших 3 м, можно фиксировать необходимые точки при помощи водолаза, что при современном развитии этого дела не вызывает особых затруднений.

Предложенный метод дает суммарное определение турбулентности на всей вертикали. Если почему-либо интересно дифференцировать явление, то опыт повторяется при пускании песка из резиновой кишки, опущенной в воду на определенную глубину. Совместное рассмотрение картин грядки при двух положениях кишки дает возможность выделить турбулентность лежащего между ними слоя.



Фиг. 3.

Метод применим для случая, когда на явление обычной турбулентности накладывается явление постоянного циркуляционного течения, направленного вверх или вниз. Это требует двойного опыта с двумя гидравлическими крупностями.

Наконец, если рассматривать турбулентность потока не только как микро-, но и как макроявление, в значительной мере обусловленное циркуляционными токами, то для экспериментального определения такой турбулентности может служить турбомер системы автора (3), основанный на промывании течением столба краски в цилиндре. Отношение концентраций пробы после той или иной экспозиции и взятого для заполнения цилиндра стандарта краски дает величину составляющей скорости, например, в вертикальном направлении, а отношение этой величины к величине продольной скорости — приближенную характеристику турбулентности.

Ряд экспериментов, проведенных автором вышеизложенными методами на различных водных объектах, позволил наметить основную зависимость между коэффициентом турбулентного обмена, полученным путем пересчета приведенных характеристик, и скоростью в виде формулы $A = d v^{2-\delta}$. Размеры δ , однако, требуют еще дальнейшего уточнения.

Всесоюзный научно-исследовательский институт
морского рыбного хозяйства и океанографии.
Москва.

Поступило
17 V 1938.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ О. К. Блумберг, Зап. ГГИ, XI (1933). ² О. К. Блумберг, Зап. ГГИ, XIII (1935). ³ О. К. Блумберг, Тр. ГГИ, вып. 1 (1936).